

ISSN 2413-9203

# ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

**TRANSPORTATION  
SYSTEMS AND  
TECHNOLOGY**  
peer-review journal

[transst.ru](http://transst.ru)

**УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

**«ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»**

Электронный рецензируемый научный журнал  
Выходит ежеквартально – 4 раза в год  
Основан в 2013 году

**ИНДЕКСАЦИЯ**

РИНЦ (Российский индекс научного цитирования)  
Google Scholar  
WorldCat  
CrossRef  
CyberLeninka

**КОНТАКТЫ**

**Адрес:** 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 115, ауд. 9/11-5  
**E-mail:** info@trassyst.ru  
**WEB:** www.trassyst.ru  
**Телефон:** +7 (812) 6198152; +7 (911) 2384445

Научный редактор Ю. Ф. Антонов, доктор технических наук, профессор  
Перевод на английский язык А. Ю. Гнатенко  
Выпускающий редактор Т. С. Антонова  
Редактор сайта А. В. Дитрих  
Литературный редактор Е. В. Васильева  
Верстка А. А. Стуканова

**СВИДЕТЕЛЬСТВО о регистрации средства массовой информации**

ЭИ№ФС77-53673 от 17.04.2013 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

**ОПИСАНИЕ ЖУРНАЛА**

Сетевой электронный журнал "Транспортные системы и технологии" публикует статьи фундаментального характера и прикладного направления, а также обзорные статьи, относящиеся ко всем видам транспортной технологии

**ПУБЛИКАЦИЯ В ЖУРНАЛЕ**

Журнал отбирает материал для публикации из числа присланных для рассмотрения рукописей. В ходе отбора проводится независимое двойное слепое рецензирование членами редакционной коллегии и внешними экспертами. Для публикации рукопись, а также все сопроводительные и дополнительные файлы следует направить в редакцию через личный кабинет на сайте журнала по URL: <http://trassyst.ru/>  
Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по <https://trassyst.ru/trassyst/about/submissions>

**ПОДПИСКА**

Журнал распространяется через Интернет без ограничений и по адресно-целевой подписке через редакцию

**ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ  
И ТЕХНОЛОГИИ**

Том 5, № 2

2019

**ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ****ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

**Зайцев Анатолий Александрович**,  
д.э.н., профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА, НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР**

**Антонов Юрий Федорович**, д.т.н., профессор ПГУПС,  
Санкт-Петербург, Россия

**МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Богданов Александр Владимирович**, д.физ.-мат.н., профессор Санкт-Петербургского Государственного университета, Санкт-Петербург, Россия;

**Верескун Владимир Дмитриевич**, д.т.н., профессор, ректор Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия;

**Ганиев Ривнер Фазылович**, академик РАН, д.т.н., профессор, Директор Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия;

**Глухих Василий Андреевич**, академик РАН, д.т.н., профессор, Научный руководитель НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия;

**Клюшпис Йоханнес**, доктор наук 2-й степени, полный профессор Деггендорфской высшей технической школы, Мюнхен, Германия;

**Колесников Владимир Иванович**, академик РАН, д.т.н., профессор, президент Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов, Россия;

**Кручинина Ирина Юрьевна**, д.т.н., ВРИО директора Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

**Линь Гобинь**, PhD, профессор, директор Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;

**Ли Вэйли**, PhD, профессор Пекинского транспортного университета, Пекин, КНР;

**Ма Чжисюнь**, PhD, старший научный сотрудник Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;

**Мулюков Радик Рафикович**, член-кор. РАН, д.физ.-мат.н., директор Института проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия;

**Мельников Сергей Владимирович**, к.биологич.н., доцент, ученый секретарь ООО «Эко-Вектор», Санкт-Петербург, Россия;

**Никитенко Владимир Александрович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика» Российского университета транспорта, Москва, Россия;

**Никитин Виктор Валерьевич**, д.т.н., профессор Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия;

**Ни Фэй**, PhD, младший научный сотрудник, Национальный транспортно-инженерный центр Маглев, Университет Тунцзи, Шанхай, КНР

**Подсорин Виктор Александрович**, д.э.н., профессор Российского университета транспорта, Москва, Россия;

**Повадол Сирирангси**, Dg., Заместитель декана Факультета логистики и управления транспортом Паньяиватского института управления, Паккред, Таиланд;

**Соколова Яна Викторовна**, к.э.н., MBA, Заместитель руководителя Научно-образовательного центра инновационных пассажирских перевозок ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;

**Соломин Владимир Александрович**, д.т.н., профессор Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия;

**Стэфан Ричард**, д.т.н., полный профессор Факультета электротехники, заведующий Лабораторией электрических машин Федерального университета Рио-де-Жанейро, Рио-де-Жанейро, Бразилия;

**Терешина Наталья Петровна**, д.э.н., профессор, Заведующая кафедрой «Экономика и управление на транспорте» Российского университета транспорта, Москва, Россия;

**Титова Тамара Семёновна**, д.т.н., Первый проректор – Проректор по науке Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия;

**Хан Хён-Сук**, PhD, начальник Департамента Маглев и линейных двигателей, старший научный сотрудник Корейского института машиностроения и материаловедения, Тэджон, Республика Корея.

**FOUNDER AND PUBLISHER**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
St. Petersburg, Russia

**“TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY”**

Electronic peer-reviewed research journal  
Issued 4 times a year (quarterly)  
Established in 2013

**INDEXING**

eLibrary (Russian Science Citation Index)  
Google Scholar  
WorldCat  
CrossRef  
CyberLeninka

**CONTACTS**

**Address:** 190031, St. Petersburg, 115 Moskovskiy Ave., room 9/11-5  
**E-mail:** info@trassyst.ru  
**Website:** www.trassyst.ru  
**Phone:** +7 (812) 6198152; +7 (911) 2384445

Science Editor Yu. F. Antonov, Doctor of Technical Science, Professor  
Translation into English A. Yu. Gnatenko  
The Executive Editor T. S. Antonova  
WEB- Editor A. V. Dietrichs  
Literary Editor E. V. Vasileva  
Layout Editor A. A. Stukanova

**AIMS & SCOPE**

Network electronic journal “Transportation Systems and Technology” publishes articles of a fundamental nature and application areas, as well as review articles pertaining to all types of transport technology

**JOURNAL CONTENT SELECTION**

The journal selects material based on the double-blind peer-review conducted by members of the editorial board and external experts.

To be published, the manuscript and all accompanying files should be sent to the editorial team through a personal account on the journal's website at: <http://trassyst.ru/>

The manuscript and additional materials should be prepared and arranged in accordance with the author guidelines (see in detail at: <https://trassyst.ru/trassyst/about/submissions>)

**SUBSCRIPTION**

The Journal is distributed via Internet for free and by subscription via Editorial office

# TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY

Vol. 5, Issue 2

2019

**ELECTRONIC PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL****EDITOR-IN-CHIEF**

**Anatoly Zaitsev**, Dr. Economics, Professor, PSTU, St. Petersburg, Russia

**DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF, THE SCIENTIFIC EDITOR**

**Yuri Antonov**, Dr.Sc., Professor PSTU, St. Petersburg, Russia

**INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD**

**Aleksandr Bogdanov**, Dr. Physics and Mathematics, Professor, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;  
**Vladimir Vereskun**, Dr. Sc., Professor, Rector of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;  
**Rivner Ganiev**, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc..., Professor, Director Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;  
**Vasily Glukhikh**, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc..., Professor, Scientific Adviser at JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», St. Petersburg, Russia;  
**Johannes Kluehspies**, 2nd Dr.'s Degree, Full Professor at Deggendorf Institute of Technology, Munich, Germany;  
**Vladimir Kolesnikov**, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc..., Professor, the President Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;  
**Irina Kruchinina**, Dr.Sc., Acting Director of Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia;  
**Guobin Lin**, PhD, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Director, Professor, Tongji University, Shanghai, China;  
**Weili Li**, Ph.D., Professor, Beijing Jiaotong University, Beijing, China;  
**Zhixun Ma**, PhD, Associate Professor, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Tongji University, Shanghai, China;  
**Radik R. Mulyukov**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Physics and Mathematics, Director of Superplasticity Metals Institute for Metals Superplasticity Problems at RAS, Ufa, Russia;  
**Sergey Mylnikov**, PhD, Associate professor, Scientific secretary LCC “Eco-Vector”, St. Petersburg, Russia;  
**Vladimir Nikitenko**, Dr. Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Physics Russian University of Transport, Moscow, Russia;  
**Viktor Nikitin**, Dr.Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia;  
**Fei Ni**, PhD, Assistant Researcher, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center, Tongji University, Shanghai, China;  
**Viktor Podsorin**, Doctor of Economics Science, Professor Russian Transport University, Moscow, Russia;  
**Sirirangsi Poovadol**, Dr.Sc., MBA, Deputy Dean Faculty of Logistics and Transportation Management Panyapiwat Institute of Management, Pakkred, Thailand;  
**Yana Sokolova**, PhD, MBA, Deputy Head Scientific-Educational Center for Innovative Passenger Transport Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia;  
**Vladimir Solomin**, Dr. Sc., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;  
**Richard Magdalena Stephan**, Dr.Sc., Full Professor, Department of Electrical Engineering, Head of Electric Machines Laboratory, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil;  
**Natalya Tereshina**, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Economics and Transport Management Russian University of Transport, Moscow, Russia;  
**Tamila Titova**, Dr.Sc., Professor, First Vice-Rector, Vice-Rector for Research at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia;  
**Han Hyung-Suk**, PhD, Head of the Department of Maglev and Linear Drives, Principle Researcher, Korea Institute of Machinery & Material (KIMM), Daejeon, the Republic of Korea.

СОДЕРЖАНИЕ		TABLE OF CONTENTS
ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ		ORIGINAL STUDIES
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление - Электротехника</p> <p><b>Ким К.К., Колесова А.В., Колесов С.Л.</b></p> <p>Улучшение токосъёма в транспортной системе типа "HYPERLOOP"</p>	5	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering</p> <p><b>Kim K.K., Kolesova A.V., Kolesov S.L.</b></p> <p>Improve Current Collection in the Transport System of the Type "HYPERLOOP"</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление - Электротехника</p> <p><b>Li W., Cao J., Li D., Wu Z.</b></p> <p>Study on Heat Exchange of Different Ventilation Structures of Asynchronous Traction Motor for High Speed EMU</p>	16	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering</p> <p><b>Li W., Cao J., Li D., Wu Z.</b></p> <p>Study on Heat Exchange of Different Ventilation Structures of Asynchronous Traction Motor for High Speed EMU</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Физика конденсированного состояния</p> <p><b>Коржов В.П., Зверев В.Н.</b></p> <p>Многослойная сверхпроводящая лента сплава Nb50Ti, полученная из композита Cu/Nb/Ti твердофазным способом</p>	31	<p>RUBRIC 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL Developments Field - Condensed matter physics</p> <p><b>Korzhov V.P., Zverev V.N.</b></p> <p>A Multilayer Superconducting Tape of the Nb50Ti Alloy obtained from a Cu/Nb/Ti Composite with a Solid Phase</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление - Электротехника</p> <p><b>Ларин О.Н., Боков А.В.</b></p> <p>О способе снижения профильных сопротивлений воздуха движению транспортного средства внутри транспортопровода</p>	47	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering</p> <p><b>Larin O.N., Bokov A.V.</b></p> <p>Decreasing of Profile Air Drag to the Train Movement Inside the Tube Transport</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ направление - Электротехника</p> <p><b>Соломин В.А., Соломин А.В., Чехова А.А., Замшина Л.Л., Трубицина Н.А.</b></p> <p>Линейные асинхронные двигатели без продольного краевого эффекта</p>	60	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering</p> <p><b>Solomin V.A., Solomin A.V., Chekhova A.A., Zamchina L.L., Trubitsina N.A.</b></p> <p>Linear Induction Motors without Longitudinal Edge Effect</p>

<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника</p> <p><b>Воеводский К.Э., Стрепетов В.М., Серeda Г.Е.</b></p> <p>Левитационные характеристики транспортной установки с электродинамическим подвесом при наличие продольного стыка в путевом полотне</p>	70	<p>Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering</p> <p><b>Voevodskii K.E., Strepetov V.M., Sereda G.E.</b></p> <p>Levitation Characteristics of a Transport Installation with an Electrodynamics Suspension During a Longitudinal Joint with Road Track</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление - Электротехника</p> <p><b>Сундуков Е.Ю., Тарабукина Н.А.</b></p> <p>Использование двухсторонней левитации транспортных модулей относительно арочной эстакады</p>	83	<p>Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering</p> <p><b>Sundukov E.Yu., Tarabukina N.A.</b></p> <p>The Use of the Bilateral Levitation of Transport Pods Relatively to the Arch Trestle</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление - Электротехника</p> <p><b>Поляков В.А., Хачапуридзе Н.М.</b></p> <p>Резоны и рациональная методика моделирования динамики магнитолевитирующего поезда</p>	92	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering</p> <p><b>Polyakov V.A., Khachapuridze N.M.</b></p> <p>Reasons for and Rational Methods of Magnetically Levitated Trains Dynamic Modelling</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p><b>Смирнов С.А., Смирнова О.Ю.</b></p> <p>Роль грузового агнитолевитационного транспорта в мировой экономике</p>	106	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p><b>Smirnov S.A., Smirnova O.Yu.</b></p> <p>Magnetic Levitation Cargo Ransport Role in World Economy</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p><b>Соколова Я.В.</b></p> <p>Об оценке влияния результатов инновационной деятельности на национальную экономику</p>	118	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p><b>Sokolova Ia.V.</b></p> <p>On Assessment of Influence of Innovation Activities Results on the National Economy</p>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Транспортные и транспортно-логистические системы</p> <p><b>Kircher R, Kluehspies J, Fritz E, Koehler R.</b></p> <p>Mobility of Demand – Vision of a Flexibe Future Urban Mobility</p>	130	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Transport and Transport &amp; Logistics Systems</p> <p><b>Kircher R, Kluehspies J, Fritz E, Koehler R.</b></p> <p>Mobility of Demand – Vision of a Flexibe Future Urban Mobility</p>

## Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление «Электротехника»

УДК [UDC] 629.439.027.34:621.318.38  
DOI 10.17816/transsyst2019525-15

© К. К. Ким<sup>1</sup>, А. В. Колесова<sup>1</sup>, С. Л. Колесов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

<sup>2</sup>Тренинговый центр ООО «Сименс Мобильность»  
(Санкт-Петербург, Россия)

### УЛУЧШЕНИЕ ТОКОСЪЕМА В ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ ТИПА "HYPERLOOP"

**Обоснование:** Транспортное средство, перемещаемое в трубе с разреженным воздухом с высокой скоростью, обеспечивает высокую производительность, безопасность, экологическую чистоту, комфортность и независимость от атмосферных явлений.

**Цель:** улучшение токосъема в скоростном диапазоне 500-700 км/ч

**Метод:** Разработан метод уменьшения износа контактной вставки на основе использования дисульфидной твердой смазки.

**Результаты:** решение уравнений магнитогидродинамики для смазочного слоя позволило выявить оптимальное значение толщины смазочного слоя.

**Заключение:** использование данной смазки целесообразно на переменном токе при этом уменьшается износ контактной вставки, снижаются степень искрения и уровень электромагнитных помех.

**Ключевые слова:** разреженный воздух, труба, перфорирование, скользящий токосъем, износ, дисульфидная твердая смазка, магнитогидродинамика.

## Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field "Electrical Engineering"

© Konstantin K. Kim<sup>1</sup>, Anna V. Kolesova<sup>1</sup>, Sergey L. Kolesov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

<sup>2</sup> Training center "Siemens Mobility" LLC  
(St. Petersburg, Russia)

### IMPROVING CURRENT COLLECTION IN THE TRANSPORT SYSTEM OF THE TYPE "HYPERLOOP"

**Background:** The vehicle moved in the pipe with rarefied air with the high speed provides high labour productivity, safety, ecological cleanness, comfort and independence from the atmospheric phenomena.

**Aim:** improving the current collection in the speed range of 500-700 km/h.

**Method:** We develop the method of decreasing the wear of the contact insert by using disulfide solid lubricant.

**Results:** of the solution of magnetohydrodynamics equations for the lubricant layer

allowed to define the optimal value of the lubricant layer thickness.

**Conclusion:** The use of this lubricant is advisable on an alternating current. In this case the wear of the contact insert, the degree of sparking and the electromagnetic noise are decreased.

**Keywords:** rarefied air, pipe, perforation, sliding current collector, wear, disulfide solid lubricant, magnetohydrodynamics.

## Введение

В настоящее время наблюдается возрождение интереса к транспортным системам, в которых пассажирские капсулы движутся в трубе с скоростями  $\sim 1000$  км/ч [1]. Для уменьшения лобового сопротивления капсулы в трубе предполагается создать технический вакуум, что приводит к необходимости использования большого количества насосов и к проблемам, связанным с поддержанием вакуума в трубе. Как показали исследования, проведенные на кафедре «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, существует оригинальное техническое решение данной проблемы, заключающееся в создании в трубе среды с разреженным воздухом (давление в 2-3 раза меньше атмосферного). Для частичной компенсации появившегося лобового аэродинамического сопротивления предлагается использовать перфорированную обшивку лобовой части капсулы с принудительным отсосом набегающего воздушного потока через отверстия в обшивке и выводом последнего в пространство за задней частью капсулы [2].

Следует отметить, что данное решение предполагает более скромные значения скорости движения капсулы  $\sim 600 - 700$  км/ч.

Уменьшение скорости движения позволяет использовать в данных транспортных системах традиционный скользящий токосъем, что благоприятно влияет на массогабаритные показатели капсулы.

В связи со сказанным возникает проблема обеспечения приемлемого качества системы токосъема, в частности уменьшения износа элементов контактных пар. В настоящее время известно много способов уменьшения износа. Один из них – за счет применения твердых смазок, например, на основе дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$  [3].

При использовании дисульфидмолибденовых смазок в электрических скользящих контактах (СК) необходимо принимать во внимание не только физико-химические, но и электрические особенности скользящего контакта. Авторами разработан и исследован способ нанесения твердосмазочного покрытия на основе дисульфида молибдена – при помощи дополнительной вставки, которая устанавливается на токоприемнике перед токовой вставкой.

Рассмотрение ряда реологических моделей твердых смазок [4] позволило сделать заключение о том, что течение смазки на основе  $\text{MoS}_2$  под токовой вставкой при прохождении электрического тока можно

описать уравнениями магнитной гидродинамики для вязкого течения. При нагреве  $\text{MoS}_2$  до  $70 - 90$  °С кристаллы дисульфида молибдена приобретают текучесть и вязкость в направлениях параллельных его слоям, а оптимальное расположение кристаллов на поверхности пар трения обеспечивается приложенным внешним электрическим полем [5].

При определенных зазорах между вставкой и контактным проводом возможно возникновение отталкивающей силы, которая стремится оторвать вставку от контактного провода и увеличить переходное сопротивление СК.

### Уравнения магнитогидродинамики для смазочного слоя

Рассмотрим плоскую задачу течения вязкой жидкости (имитирует слой смазки) в поперечном электромагнитном поле в полубесконечном пространстве (Рис.1).

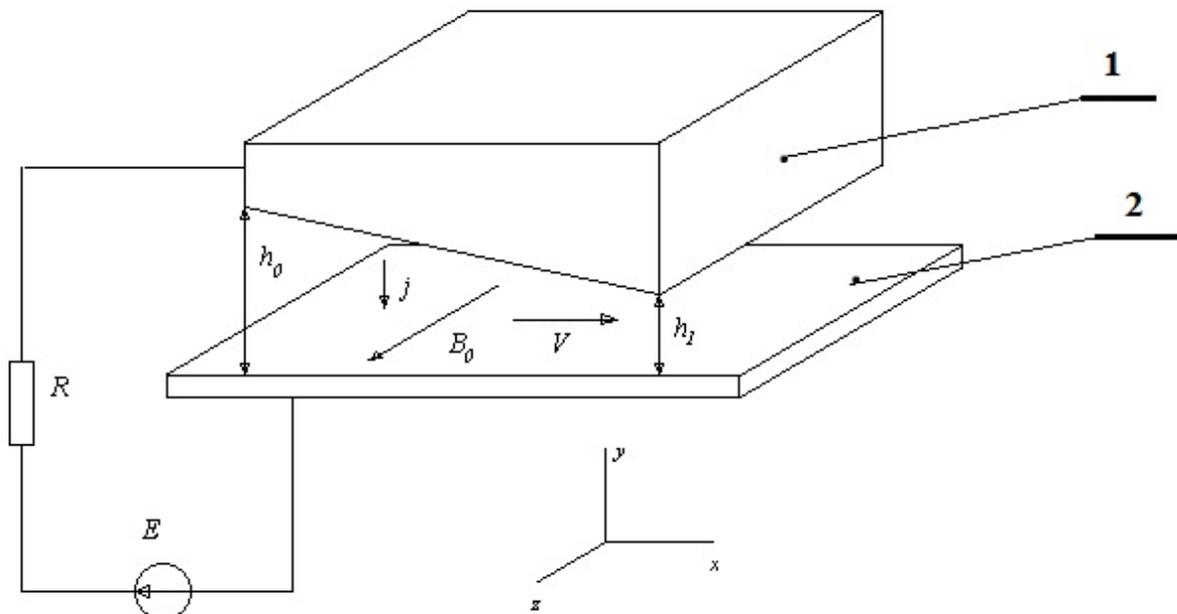


Рис. 1. К расчету магнитогидродинамической модели течения смазки:  
1 – токовая вставка, 2 – контактный провод,  $E$  – источник ЭДС,  
 $R$  – сопротивление цепи питания.

Общее уравнение движения жидкой смазки в электромагнитном поле имеет вид [6]:

$$\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{V} \right\} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{V} + \mu (\mathbf{j} \times \mathbf{H}),$$

где  $\rho$  – плотность смазки,  $V$  – скорость течения смазки (скорость движения контактной вставки),  $p$  – давление между контактной вставкой и контактным проводом,  $\eta$  – динамическая вязкость смазки,  $j$  – плотность тока в контакте,  $H$  – напряженность магнитного поля в зоне контакта.

Если рассматривать стационарную плоскопараллельную задачу, то уравнение данное уравнение движения жидкой смазки приведет к виду:

$$-\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{V} + \mu(\mathbf{j} \times \mathbf{H}) = 0$$

Уравнения для плоского пограничного слоя уравнения магнитной гидродинамики будут иметь вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0,$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\sigma}{\rho} \mu^2 u H_0^2,$$

здесь  $u$  – продольная составляющая вектора скорости,  $\nu$  – магнитная вязкость смазочного слоя,  $\sigma$  – удельная проводимость смазки,  $\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость смазки,  $H_0$  – напряженность магнитного поля в зоне СК.

Последнее уравнение движения можно привести к виду:

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - j_y B_0, \quad (1)$$

где  $j_y$  – плотность тока в контакте,  $B$  – магнитная индукция в СК.

Распределение слоя смазки выражается в виде функции от координаты  $x$ :

$$h(x) = h_0 - k_x x,$$

где  $k_x = (h_0 - h_1) / b_{\text{вставки}}$ ,  $b_{\text{вставки}}$  – ширина токовой вставки.

Если пренебречь второстепенными эффектами, то выражение для ВАХ СК можно записать как

$$j_y = \sigma(E_y + uB_0),$$

$$j_x = \sigma E_x,$$

$$j_z = \sigma(E_z - uB_y).$$

Теперь из равенства  $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$  и  $h \ll \langle k_x \text{ и } j_y \rangle \gg j_x$  следует, что  $\frac{\partial j_y}{\partial y} \approx 0$  и  $j_y$  является по существу только функцией  $z$  и  $x$ . Величина  $B_0$  не является постоянной, а является функцией тока и координаты  $x$ .

Уравнение (1) невозможно проинтегрировать аналитически, и приближенное решение можно получить только для очень больших или очень малых чисел Гартмана [7]

$$M^2 = \frac{B_0^2 h_1^2 \sigma}{\eta}. \quad (2)$$

Для рассматриваемого случая число Гартмана имеет порядок  $10^{-9}$  [6], следовательно, приближенное решение можно получить в аналитическом виде. Кроме того, малое значение числа Гартмана предполагает существенное упрощение задачи: суммарное силовое поле определяется суперпозицией воздействий гидродинамического и электромагнитного поля.

Уравнение (1) можно проинтегрировать, используя граничные условия:  $y=0$  при  $u=V$  и  $y=h$  при  $u=0$ .

$$u = \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} - j_y B_0 \right) (y^2 - hy) + \frac{V}{h} (h - y), \quad (4)$$

Величина удельной проводимости может быть определена из зависимости, представленной на Рис. 2 [8] для соответствующей температуры элементов скользящего контакта.

Расход смазки можно выразить через интеграл скорости по толщине смазки.

$$Q = \int_0^h u dy = -\frac{h^3}{12\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} - j_y B_0 \right) - \frac{Vh}{2}. \quad (5)$$

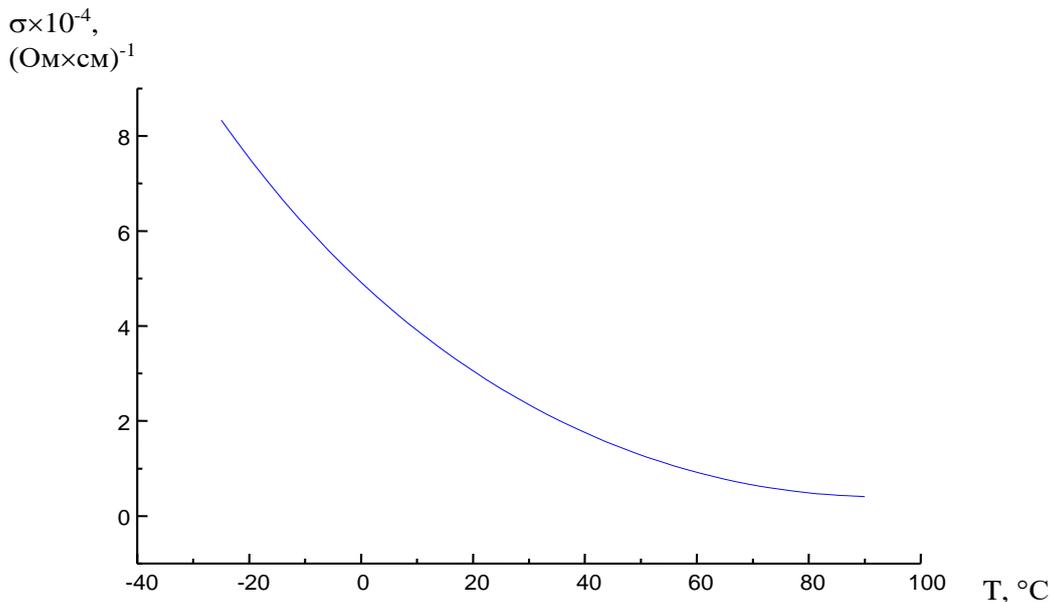


Рис. 2. Зависимость удельной проводимости  $\text{MoS}_2$  от температуры

Используя граничные условия [9] можно найти распределение давления:

$$p = -12\mu \int_0^x \left( \frac{Q}{h^3} - \frac{V}{2h^2} \right) dx + B_0 \int_0^x j_y dx. \quad (6)$$

Из закона Ома можно определить распределение плотности тока, она выразится через напряженность электрического поля и скорость течения.

Переходное падение напряжения в слое смазки определяется следующим соотношением:

$$\Delta U = -\int_0^h E_y dy \quad (7)$$

Переходное падение напряжения в точке  $y=0$  должно равняться 0. Интегрируя выражение для плотности тока (3):

$$j_y h = \sigma \int_0^h E_y dy - \sigma B_0 \int_0^h u dy \quad (8)$$

и, используя выражение для расхода смазки, можно определить плотность тока:

$$j_y = -\frac{\sigma}{h} (B_0 Q + \Delta U). \quad (9)$$

Используя второе граничное условие  $p=0$  при  $x=b_{\text{вставки}}$ .

$$0 = -12\mu \int_0^{b_{\text{вставки}}} \left( \frac{Q}{h^3} - \frac{V}{2h^2} \right) dx + B_0 \int_0^{b_{\text{вставки}}} j_y dx \quad (10)$$

Полный ток определяется соотношением:

$$I = \int_0^{b_{\text{вставки}}} j_y dx. \quad (11)$$

Из выражения (10) можно определить расход смазки:

$$Q = \frac{h_0 \frac{h_0}{h_1} - 1}{\left( \frac{h_0}{h_1} \right)^2 - 1} \left[ V + \frac{k \cdot B_0 \cdot I \cdot h_0}{6\mu \left( \frac{h_0}{h_1} - 1 \right)} \right]. \quad (12)$$

Тогда переходное падение напряжения равно

$$\Delta U = - \left( \frac{kI}{\sigma \ln \frac{h_0}{h_1}} + B_0 Q \right). \quad (13)$$

Распределение плотности тока по поверхности вставки имеет вид:

$$j_y = \frac{kI}{\ln \frac{h_0}{h_1}} \cdot \frac{1}{h}. \quad (14)$$

Для удобства записи вводится коэффициент  $\beta$ :

$$\beta = \frac{kh_0 B_0 I}{6\eta V}. \quad (15)$$

Распределение относительного давления между вставкой и контактным проводом имеет вид:

$$\bar{p}(x) = \left\{ \left[ \frac{\left(\frac{h_0}{h(x)} - 1\right) - \left(\frac{h_0}{h_1} - 1\right) \frac{\left(\frac{h_0}{h(x)}\right)^2 - 1}{\left(\frac{h_0}{h_1}\right)^2 - 1} \right] + \beta \left[ \frac{\ln \frac{h_0}{h(x)} - \frac{\left(\frac{h_0}{h(x)}\right)^2 - 1}{\left(\frac{h_0}{h_1}\right)^2 - 1} \right] \right\}. \quad (16)$$

Несущая способность МГД-слоя в относительных единицах определяется интегралом от давления по длине вставки:

$$\bar{W} = \int_0^{b_{\text{вставки}}} \bar{p} dx = \left\{ \left[ \frac{h_0}{h_1} \ln \frac{h_0}{h_1} - \left(\frac{h_0}{h_1} - 1\right) \frac{\left(\frac{h_0}{h_1} - 1\right)^3}{\left(\frac{h_0}{h_1}\right)^2 - 1} \right] + \beta \left[ \frac{\left(\frac{h_0}{h_1} - 1\right) - \frac{\left(\frac{h_0}{h_1} - 1\right)^2}{\left(\frac{h_0}{h_1}\right)^2 - 1} \right] \right\}. \quad (17)$$

Из анализа выражения (17) можно предложить оптимальный способ уменьшения избыточного давления под вставкой, который заключается в соблюдении равенства:

$$\frac{h_0}{h_1} = 1. \quad (18)$$

При таком сочетании не возникает избыточного давления между вставкой и контактным проводом. При отклонении от соотношения (18) в большую сторону наблюдается увеличение переходного падения напряжения, и, следовательно электрических потерь в контакте. При отклонении в область низких значений возникает процесс кавитации и увеличиваются механические потери в СК.

Практически указанное соотношение достигается либо подбором давления на дисульфидную вставку, либо вариацией ее контактной поверхности.

Правомерность выдвинутой гипотезы можно косвенно проверить, исследуя такую характеристику СК, как износ вставки или исследуя переходное падение напряжения в контакте.

Для проведения эксперимента по нахождению оптимальных условий работы дисульфида молибдена был создан стенд на базе асинхронной машине с фазным ротором АК-52 (АД) мощностью 4,5 кВт. Здесь контактный провод имитировался контактным кольцом, токовая вставка – токоведущими щетками марки МГ-4 (контактная площадь щетки  $S_{\text{щ}}=1,6 \text{ см}^2$ , давление на щетку  $p_{\text{щ}}=400 \text{ г/см}^2$ ), дисульфидная вставка – дополнительной щеткой из дисульфида молибдена. Давление на дополнительную щетку варьировалось по следующим уровням:  $p_{(Д)}=100 \text{ г/см}^2$ ,  $250 \text{ г/см}^2$ ,  $400 \text{ г/см}^2$ . Площадь контактирования дополнительной щетки составляла  $S_{(Д)}=0,4 \text{ см}^2$ ,  $0,8 \text{ см}^2$ ,  $1,2 \text{ см}^2$ . Это составляло 25 %, 50 %

и 75 % контактной поверхности токоведущей щетки. Эксперимент трижды дублировался. Величины износа определялись стрелочным индикатором с уточнением при помощи взвешивания на аналитических весах. При реализации данного эксперимента в течение двадцати часов получена математическая модель износа в относительных единицах:

$$I_h = 0.026 + 0.0086 \cdot \underline{S}_{(Д)} + 0.0114 \cdot \underline{p}_{(Д)}^2 + 0.015 \cdot \underline{S}_{(Д)}^2. \quad (19)$$

Графическая интерпретация полученного полинома представлена на Рис. 3.

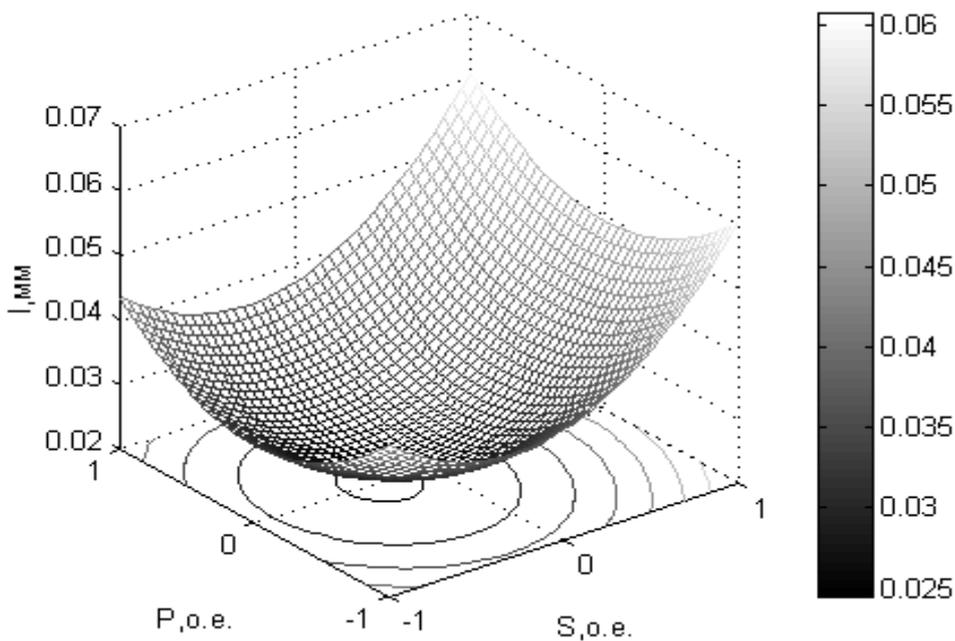


Рис. 3. Графическая интерпретация полинома износа щетки МГ-4

Минимум износа щетки наблюдался в точке, в которой МГД-сила равнялась 0. Для рассматриваемой системы это составляет  $S_{(Д)}(min)=0,9 \text{ см}^2$ ,  $p_{(Д)}(min)=150 \text{ г/см}^2$ .

В заключение следует сказать, что применение дисульфида молибдена на указанной ССТ АД при оптимальных сочетаниях давления на дополнительную щетку и ее контактной площади позволяет уменьшить износ рабочих щеток в 1,7–2 раза [10–15].

### Выводы

При использовании твердых смазок на основе дисульфида молибдена значительно уменьшается износ токовых вставок, значительный вклад в наблюдаемый эффект делает электрическое поле, ориентирующее кристаллы в таком направлении, что трение становится магнитогидродинамическим.

Решение уравнений магнитогидродинамики для смазочного слоя позволяет выявить оптимальное значение толщины смазочного слоя. Теоретическое решение задачи хорошо совпадает с экспериментальными данными. Для конкретной контактной пары определены сочетания давления и площади контактирования дополнительной щетки, имитирующей дисульфидную вставку, обеспечивающие оптимальную величину смазочного слоя.

**Авторы заявляют что:**

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей или животных в качестве объектов исследований.

**Библиографический список / References**

1. Форгач Р.Л. Скоростной вакуумный трубопроводный транспорт – конкурент реактивной авиации // Наземный транспорт 80-х годов. Под ред. Р. Торнтон. – 1974. – С. 121–137. [Forgach RL. Skorostnoj vakuumnyj truboprovodnyj transport – konkurent reaktivnoj aviacii. *Nazemnyj transport 80-h godov*. In: Tornton R., editor. 1974:121-137. (In Russ.)].
2. Патент РФ на полезную модель № 24670/20.08.02. Бюл. № 23. Ким К.К. Кузов головного вагона высокоскоростного поезда. Режим доступа: [http://www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet). Дата обращения: 04.07.2018. [Patent RUS №24670/20.08.02. Byul. №23. Kim KK. Body of the head car of the high-speed train. Available from: [http://www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet) (In Russ.)].
3. Ким К.К. Вариант вакуумной транспортной системы // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 12. – С. 67 – 68. [Kim KK. Variant of vacuum transport system. *Railway transport*. 2016;(12):67-68. (In Russ.)].
4. Ким К.К., Барбарович В.Ю., Литвинов Б.Я. Метрология и техническое регулирование. Учебное пособие. – Москва, 2006. – 255 с. [Kim KK, Barbarovich VY, Litvinov BY. Metrologiya i tekhnicheskoe regulirovanie. Schoolbook. Moscow, 2006. 255 p. (In Russ.)].
5. Пат. РФ на изобретение № 2677216/15.01.2019 Бюл. № 2. Ким К.К., Крон И.Р., Ватулин Я.С. Система электродинамического подвеса. Режим доступа: [http://www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet). [Pat. RUS № 2677216/15.01.2019. Byul. № 2. Kim KK, Kron IR, Vatulin YS. Electrodynamic suspension sistem. [http://www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet) (In Russ.)].
6. Pai S-I. Magnetogasdynamics and Electromagnetogasdynamics. *Magnetogasdynamics and Plasma Dynamics*. Springer Vienna; 1962;27-40. doi: 10.1007/978-3-7091-8083-9\_4
7. Сентюрихина Л.Н., Опарина Е.М. Твердые дисульфидмолибденовые смазки. – М: Химия, 1966. – 152 с. [Sentyurikhina LN, Oparina EM. *Tverdye disulfidmolibdenovye smazki*. Moscow: Himiya, 1966. 152 p. (In Russ.)].
8. Ким К.К., Изотов А.И., Колесов С.Л. К вопросу применения твердых смазок в системах скользящего токосъема электрических машин // Электротехника. – 2001. – № 3. – С. 30–33. [Kim KK, Izotov AI, Kolesov SL. Application of hard lubricants (HL) in the sliding current pick-off (SCPO) systems. *Elektrotehnika*. 2001;3:30-33. (In Russ.)].
9. Rittenhouse JB, Jaffe LD, Nageler RG, Martens HE. Friction measurements on a low Earth satellite. *ASLE Transact.* 1963;6(3):161-177. doi: 10.1080/05698196308972010
10. Elco RA, Hughes WF. Magnetogydrodynamic pressurization of liquid metal bearings.

- Wear*. 1962;5(3):198-212. doi:10.1016/0043-1648(62)90004-2
11. Hughes WF. Magnetohydrodynamic bearings. *Wear*. 1963;6:315-324. doi: 10.1016/0043-1648(63)90164-9
  12. Никитин В.В., Стрепетов В.М., Волювач А.С. Варианты схем электроснабжения транспортного средства с комбинированной системой левитации и тяги на переменном токе // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3-4. – С. 54-62. [Nikitin VV, Strepetov VM, Voluvach AS. Varianty schem electrosnabzhenia transportnogo sredstva s kombinirovannoy sistemoy levitazii i tyagi na peremennom toke. *Izvestia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2010;(3-4):54-62. (In Russ.)].
  13. Стрепетов В.М., Никитин В.В. Оценка энергетической эффективности пусковых режимов работы комбинированной системы левитации и тяги на однофазном переменном токе // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2006. – № 2. – С.145–159. [Strepetov VM, Nikitin VV. Ocenka energeticheskoy effektivnosti puskovykh rezhimov raboty kombinirovannoy sistemy levitacii i tyagi na odnofaznom peremennom toke. *Proceeding of Petersburg Transport University*. 2006;(2):145-159. (In Russ.)].
  14. Байко А.В., Никитин В.В., Стрепетов В.М. Определение параметров схемы замещения комбинированной системы левитации и тяги на переменном токе / Материалы III международного симпозиума «Электрификация и развитие энергосберегающей инфраструктуры и электроподвижного состава на железнодорожном транспорте – ЭЛТРАНС-2005» Санкт-Петербург, 17–19 ноября 2005 г. СПб, ПГУПС, 2007, – С. 119–123. [Bajko AV, Nikitin VV, Strepetov VM. Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya kombinirovannoy sistemy levitacii i tyagi na peremennom toke. *Proceedings of the III International Symposium "Elektrifikaciya i razvitie energosberegayushchej infrastruktury i elektropodvizhnogo sostava na zheleznodorozhnom transporte – ELTRANS-2005"* St. Petersburg, 2005, Nov. 17–19; St. Petersburg: PGUPS; 2007. pp. 119-123. (In Russ.)].
  15. Никитин В.В., Стрепетов В.М. Энергообеспечение бортовых электромагнитов комбинированной системы левитации и тяги на переменном токе // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 25–38. [Nikitin VV, Strepetov VM. Vehicle electromagnets energy supply of A.C. combined levitation and traction system. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(3):25-38. (In Engl., In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20173325-38
  16. Хожайнов А.И., Никитин В.В., Серeda Е.Г. Энергосберегающие преобразователи электроприводов магнитолевитационных транспортных систем / Труды 2-й международной научной конференции «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии МТСТ-14», Санкт-Петербург, 17-20 июня 2014 г. – Киров: МЦНИП, 2014. – С. 313–322. [Hozhainov AI, Nikitin VV, Sereda EG. Energosberegayushchie preobrazovateli elektroprivodov magnitolevitacionnykh transportnykh sistem. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii MTST-14"* 2014, Jun 17-20; St. Petersburg. Kirov: MCNIP LLC; 2014. pp. 313-322. (In Russ.)].
  17. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А, Серeda А.Г., и др. Магнитолевитационная технология как транспортная стратегия высокоскоростного движения / Материалы IV международной научно-технической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте». СПб, ПГУПС, 2014. – С. 183–184. [Antonov YuF, Zajcev AA, Sereda AG, et al. Magnitolevitacionnaya tekhnologiya kak transportnaya strategiya vysokoskorostnogo dvizheniya. *Proceedings of the IV international scientific and technical conference "Intellektual'nye sistemy na transporte"* St. Petersburg: PGUPS; 2014. pp. 183-184. (In Russ.)].

**Сведения об авторах:**

**Ким Константин Константинович**, доктор технических наук, профессор;  
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;  
E-mail: kimkk@mail.ru

**Колесова Анна Владимировна**;  
eLibrary SPIN: 2392-9750; ORCID: 0000-0002-2744-7932;  
E-mail: kolesoff76@mail.ru

**Колесов Сергей Львович**, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 4356-0993; ORCID: 0000-0002-4252-1854;  
E-mail: kolesoff\_s\_1@mail.ru

**Information about the authors:**

**Konstantin K. Kim**, doctor of technical Sciences, professor; phone: +7(812)4578142;  
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;  
E-mail: kimkk@mail.ru

**Anna V. Kolesova**;  
eLibrary SPIN: 2392-9750; ORCID: 0000-0002-2744-7932;  
E-mail: kolesoff76@mail.ru

**Sergey L. Kolesov**, candidate of technical Sciences, associate Professor;  
eLibrary SPIN: 4356-0993; ORCID: 0000-0002-4252-1854;  
E-mail: kolesoff\_s\_1@mail.ru

**Цитировать:**

Ким К.К., Колесова А.В., Колесов С.Л. Улучшение токосъёма в транспортной системе типа "HYPERLOOP" // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 5–15. doi: 10.17816/transsyst2019525-15

**To cite this article:**

Kim KK, Kolesova AV, Kolesov SL. Improve Current Collection in the Transport System of the Type "HYPERLOOP". *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):5-15. doi: 10.17816/transsyst2019525-15

## Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

### Field “Electrical Engineering”

DOI: 10.17816/transsyst20195216-30

© Weili Li, Zhigang Wu, Junci Cao, Dong Li  
School of Electrical engineering, Beijing Jiaotong University  
(Beijing, China)

### STUDY ON HEAT EXCHANGE OF DIFFERENT VENTILATION STRUCTURES OF ASYNCHRONOUS TRACTION MOTOR FOR HIGH SPEED EMU

**Background:** Aiming at the problems of high local temperature and uneven temperature distribution in asynchronous traction motor of high-speed Electric Multiple Unit (EMU) when it is running.

**Aim:** In this paper, the influence of ventilation system with different structure on temperature distribution is studied.

**Methods:** Taking 600 kW asynchronous traction motor as an example, the electromagnetic-fluid-temperature analysis model of the traction motor is established, and the temperature values of different positions in the motor are obtained.

The accuracy of the calculation results is verified by comparing with the actual measurement.

On this basis, by adjusting the structure of stator and rotor axial ventilation holes, the relationship between temperature distribution and fluid flow state in motor is studied.

In addition, the influence of fluid incidence angle on fluid velocity and heat dissipation performance of motor is also studied, and the ventilation structure scheme with relative balance of axial and circumferential temperature in motor is found out, which provides a reference strategy for the design of temperature rise of motor with forced ventilation structure.

**Results:** The wind speed near the intake side of stator teeth and rotor teeth groove is less than that far from the intake side. The flow distribution trend of rotor vent is similar to that of stator vent, but the air in the groove is affected by centrifugal force of rotor rotation, which makes the wind speed difference on the intake side larger than that on the outlet side.

The stator winding and rotor guide bar are affected by wind temperature to reach the maximum temperature at the end of the outlet respectively. The stator core is higher at the windward side and the leeward side than the other parts of the motor. The heat dissipation effect at both ends is good.

The highest temperature of the stator core appears near the leeward side.

**Key Words:** Traction Motor, Ventilation System, Fluid Flow State.

© 李伟力, 吴志刚, 曹君慈, 李栋  
北京交通大学电气学院  
(中国北京)

## 高速动车组异步牵引电机不同通风结构

**摘要:** 针对高速动车组异步牵引电机运行时局部温度高, 电机内温度分布不均匀的问题, 本文研究电机不同结构的通风系统对温度分布的影响. 以 600 Kw 异步牵引电动机为例, 建立了牵引电机电磁-流体-温度分析模型, 得到了电机内不同位置的温度值, 并与实测进行对比, 验证了计算结果的准确性. 在此基础上, 通过调整定子和转子轴向通风孔的结构形式, 研究电机内温度分布与流体流动状态的关系; 此外, 还研究流体入射角对流体流速与电机散热性能的影响, 找出电机内轴向及周向温度相对平衡的通风结构方案, 为强迫通风结构型式的电机温升设计提供参考策略.

**关键词:** 高速铁路牵引电机, 通风系统, 流体流动状态.

### 1. INTRODUCTION

The traction motor in the traction drive system is one of the core components of high-speed train and EMU. Its performance determines the quality of train power and is directly related to the safety of high-speed railway operation. Because of the limited space for motor placement in high-speed train, the high power density of motor and its large heat load, the motor heats seriously, which affects the service life of motor and the safety of train operation. At present, motor temperature control is the biggest bottleneck in the development of traction motor, the high ambient temperature makes the air intake temperature high; the air intake is blocked by debris, which makes the air intake not smooth, resulting in small air intake; the excessive dust inside the motor affects heat dissipation; the fan damage causes no wind or small air volume; the unreasonable ventilation structure makes the short circuit of the air circuit and so on will cause the motor to heat dissipation and increase temperature. If the motor works at the highest allowable temperature for a long time, it will accelerate insulation aging and eventually burn down the motor. Therefore, accurate calculation of the internal temperature of the motor is of great significance for improving the ventilation structure of the motor.

Many scholars have studied the fluid-structure coupling calculation of temperature-fluid. Dae G.K. establishes a three-dimensional coupling model of traction motor to solve the problem of heat dissipation caused by the closed structure of traction motor. The flow rate of cooling medium in the original model is analyzed. The cooling performance of traction motor is improved by changing its ventilation and cooling structure [1]. Mugglestone J. et al. used CFD software to simulate the flow field and heat transfer process in the stator end region of an air-cooled induction motor. The results show that the

circulating current is generated at the stator end winding side and the local heat transfer coefficient is estimated. The results show that the spatial variation of the fluid is correct [2]. Mayle E.R. et al. put forward an analysis method considering the rotating state of gas between stator and rotor of turbogenerator. This analysis also takes into account the changes of flow rate, angular momentum and static pressure in the incident region of cooling gas. Simple calculation shows that the average tangential velocity of this rotating gas flow is different from that of taking it as half of the rotating speed of the rotor. By comparison, the former is found to be more practical [3]. Xiaolong Lu analyzed the transient and steady-state temperature field of rotary ultrasonic motor by finite element method, and simulated the ultrasonic motor with different sizes. It was found that the temperature distribution of different types of motor had different inhomogeneity, and the time needed to achieve thermal stability was also different. However, the highest temperature point of the motor was located at the interface between the stator and the rotor, and passed through the simulation. Experiments verify the accuracy of the calculation method [4].

In this paper, the finite volume method in numerical algorithm is used to establish the three-dimensional global model of the motor. The air flow and temperature distribution in the motor are analyzed accurately by fluid-solid coupling, and the ventilation structure is improved accordingly.

## 2. ESTABLISHMENT OF MOTOR MODEL AND ANALYSIS OF FLUID COMPUTATION

### 2.1. Establishment of fluid-temperature model for traction motor

The traction motor of 600 kW high-speed train studied in this paper adopts axial ventilation cooling structure, and its basic rated parameters are shown in Table 1.

*Table 1. Basic parameters of traction motor for high-speed train*

Motor parameters	Value
Rated power/kW	600
Rated voltage/V	2730
Rated current/A	155
frequency/Hz	155.55
efficiency	94 %
Stator length/mm	270
Stator Dia/mm	555

In this paper, the motor adopts an open-circuit cooling axial ventilation mode, which is divided into three channels for ventilation, one way into the stator ventilation ditch, one way into the air gap between the stator and the rotor, one way into the rotor ventilation ditch. Fig. 1 is a schematic diagram of the ventilation structure of the motor. The direction indicated by the arrow is the direction of fluid flow in the motor.

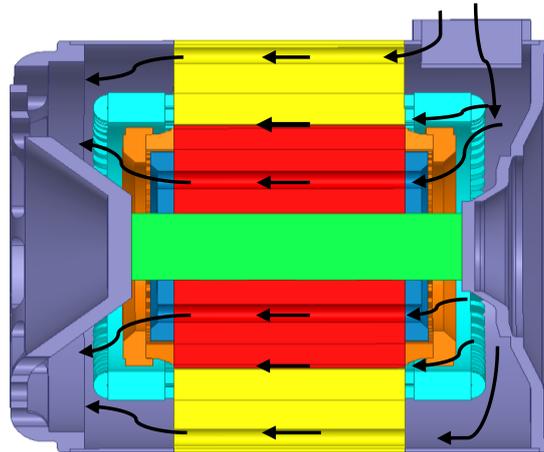


Fig. 1. Ventilation structure of traction motor for high-speed train

On this basis, in order to reasonably solve the fluid-structure coupling model of the motor, the basic assumptions are as follows.

(1) The Reynolds coefficient of air-fluid in the motor is larger than 2300, so there is turbulence in the motor, and the flow pattern of the fluid belongs to turbulence.

(2) Because of the small influence of buoyancy and gravity on the fluid flow in the motor under standard atmospheric pressure, it is neglected.

(3) The compressibility of gas is related to ambient temperature and external pressure. Whether the density change can be neglected depends on the Mach number of gas flow. Because the velocity of fluid flow in motor is less than that of sound, the fluid is treated as incompressible fluid [5].

(4) Winding insulation varnish uniformly.

(5) It is concluded that slot wedge and slot insulation are the same width and have the same insulation properties.

(6) In this paper, the steady flow state of fluid in the steady state of motor is studied, so the solving equation does not contain time variable [6].

(7) Assuming that the heat source density is evenly distributed in all parts of the motor [7].

The structure diagram of the motor is obtained as shown in Fig. 2.

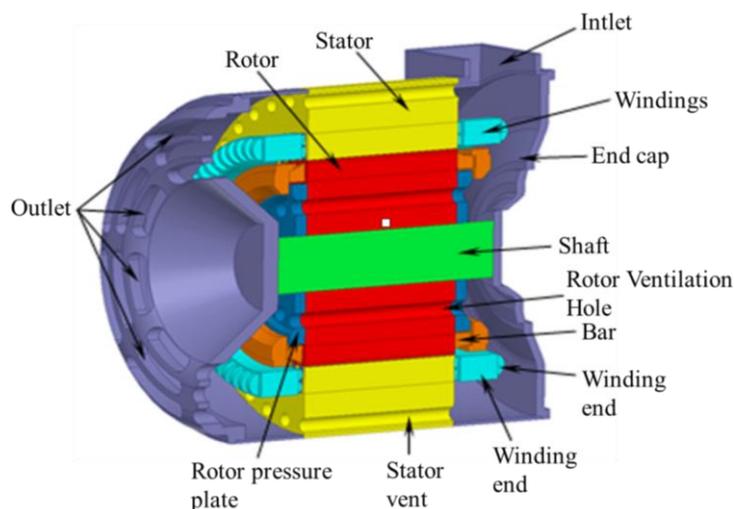


Fig. 2. Solving Domain Internal Structure Diagram

The loss of each part of the motor is obtained by the calculation and analysis of the electromagnetic field and the actual measurement results as shown in Table 2.

Table 2. Distribution Table of Motor Loss under Load

	Loss (kW)
Winding	5.814
Stator tooth	2.667
Stator yoke	5.825
Rotor guide bar	3.900
Additional loss	3.159

According to the characteristics of the solution domain, the following boundary conditions are listed.

(1) The entrance boundary condition is velocity entrance, and the entrance velocity is 25.5 m/s.

(2) The solid surfaces in contact with air are all set as non-slip boundary conditions.

(3) The air inside the rotor is a rotating flow field, and the stator air is simulated as a static state.

(4) The boundary condition of outlet is pressure outlet, and the initial pressure is one atmospheric pressure.

(5) According to the given losses, the heat sources of stator winding, stator yoke, stator teeth, rotor core and rotor guide bar are assigned respectively [8].

## 2.2. Analysis and experimental verification of calculation results of fluid-temperature field of traction motor

Fig. 3(a) shows the overall fluid flow state near the intake side, and Fig. 3(b) shows the overall fluid flow state far from the intake side. The flow vector diagram of the intake part is intercepted and enlarged, and the flow direction of the two parts above the intake and outlet cavity is analyzed respectively.

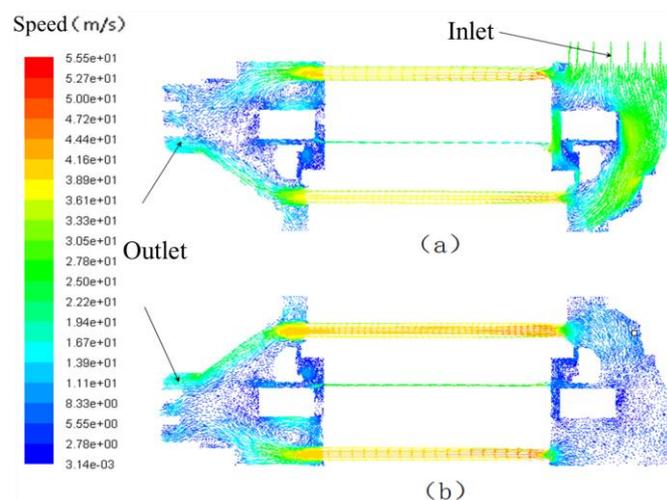


Fig. 3. Vector Chart of Fluid Velocity in Radial Section of Motor

The fluid trace of stator vent is shown in Fig. 4. It can be seen that the eddy current around the vent of stator vent is uniformly distributed in the bending part of stator winding end.

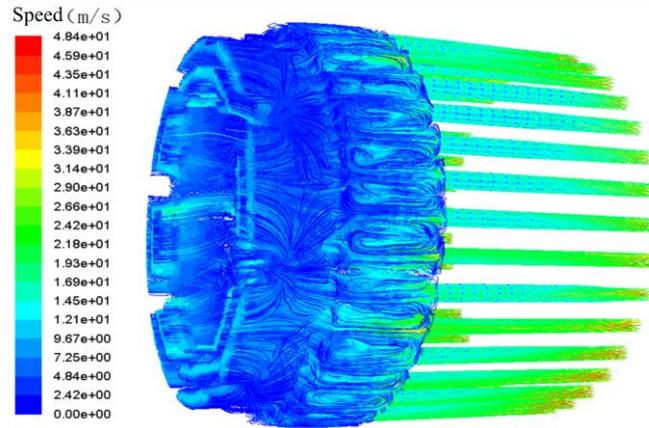


Fig. 4. Fluid Trace of Stator Ventilation Hole

According to the calculation of motor fluid, the temperature distribution of the motor is obtained. Fig. 5 shows the three-dimensional temperature distribution cloud of the whole motor. According to the results shown in the graph, the highest surface temperature of the stator core is about 117 °C. It appears near the outlet side of the axis center and transfers heat to the two ends of the shell. As the axial position moves toward the outlet, the closer the temperature is to the core part, the higher the temperature is. Because the fluid convection heat transfer between the core section and the heat source inside the motor, the overall air temperature at the outlet is higher than that at the inlet, which results in the temperature of the inlet casing being about 30 degrees lower than that of the outlet casing. The highest temperature in the motor is 217 °C, which appears on the end ring of the rotor in the air outlet chamber.

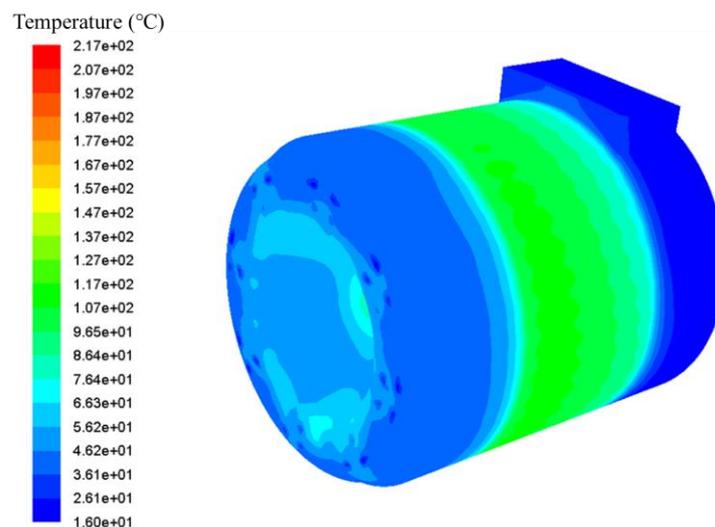


Fig. 5. Overall Temperature Distribution Cloud of Motor

In order to better study the internal temperature of the motor, the temperature of the central surface of the motor shaft is intercepted for analysis [9], as shown in Fig. 6. The temperature distribution of the stator winding is more uniform along the axis. The temperature distribution of the stator winding near the intake side is lower than that far away from the intake side. The temperature of the rotor guide bar is the highest in the whole section, and its temperature value is 159 °C. The heat transfer process of the stator part is that the stator winding is transferred to the slot insulation, and then to the given teeth and yoke of the stator. The heat transfer process of the rotor part is that the rotor guide bar is transferred to the core of the rotor, and then to the rotating shaft.

Under the rated condition of stable operation of the motor, the temperature at the yoke of the motor shaft center opposite the intake port near the root of the stator teeth was collected by embedding a temperature sensor. The temperature value was 110 °C, and the calculated value of the corresponding position was 111.92 °C.

At the same time, static and dynamic pressure experiments were carried out inside the intake. The results show that the measured static pressure is 1906 Pa, the calculated value of corresponding position is 1810 Pa, and the measured dynamic pressure is 727 Pa, and the calculated value of corresponding position is 697 Pa.

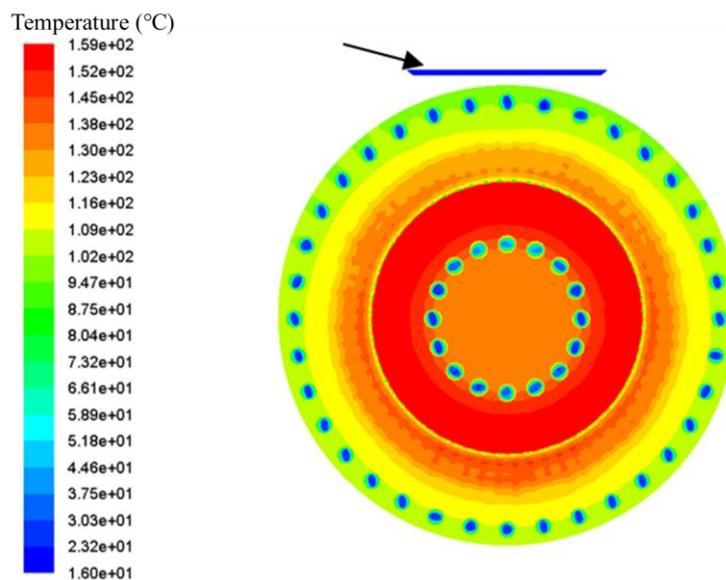


Fig. 6. Cloud Map of Temperature Distribution in the Center Section of Motor Shaft

By comparing the calculated and measured values of temperature, static pressure and dynamic pressure, it can be seen that the error between the calculated and experimental values of temperature is 1.7 %, the relative error of static pressure is 5.0 %, and the relative error of dynamic pressure is 4.1 %. The experimental results show that the model is consistent with the actual situation and the accuracy of the calculation method used.

### 3. FLUID AND TEMPERATURE FIELDS OF MOTORS WITH DIFFERENT VENTILATION STRUCTURES

Although the highest temperature occurs at the end ring of the rotor, the high temperature resistance of the rotor is strong, and the temperature rise of stator insulation is limited. In this paper, aiming at reducing the temperature rise of stator winding, the ventilation structure is improved, and the influence of the position of stator ventilation hole on the fluid and temperature field of the motor is studied. On the basis of this, the best scheme is selected. Then, the change of the inlet fluid incidence angle on the motor is studied. The influence of fluid field on internal temperature field.

#### 3.1. Effect of Radial Position of Stator Ventilation Hole on Motor Fluid and Temperature

According to the fluid and temperature distribution characteristics of the original model, three schemes are proposed to adjust the radial position of the stator ventilation holes without changing the other structures of the motor, respectively, as shown in Fig. 7. The original model stator ventilation ditch is located at 0.2575 m of the core radial position. The three schemes set the ventilation holes at 0.247 m, 0.237 m and 0.227 m of the core radial position respectively.

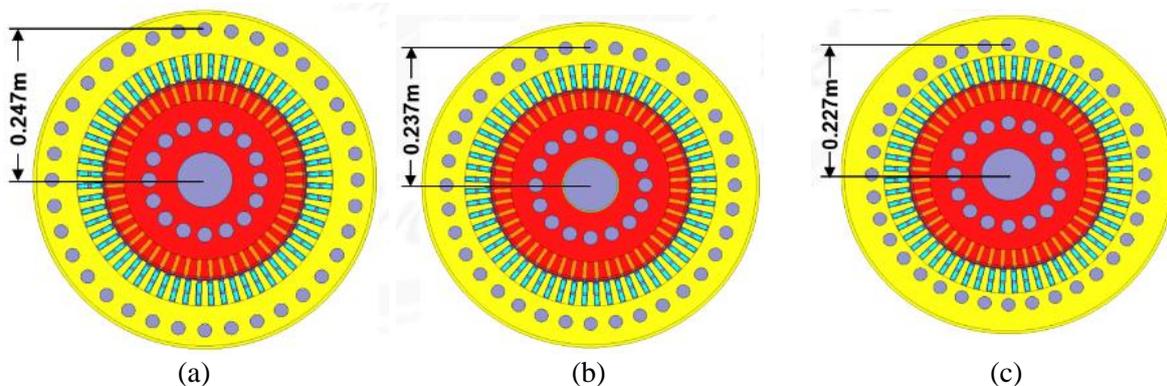
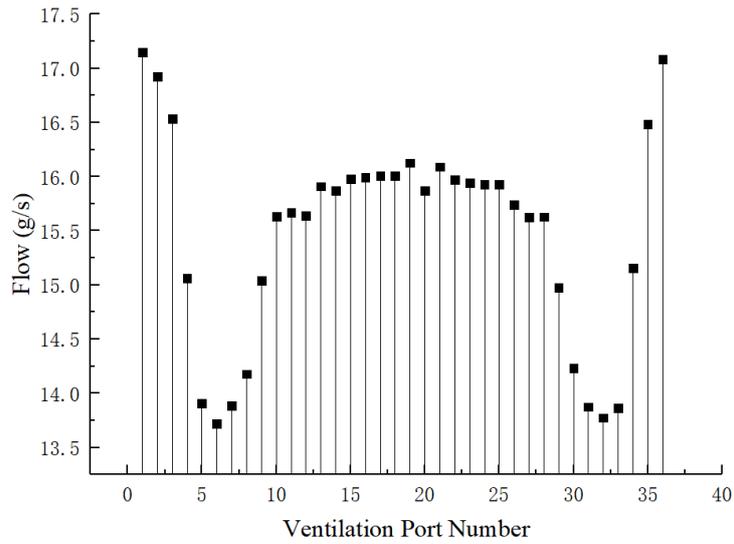
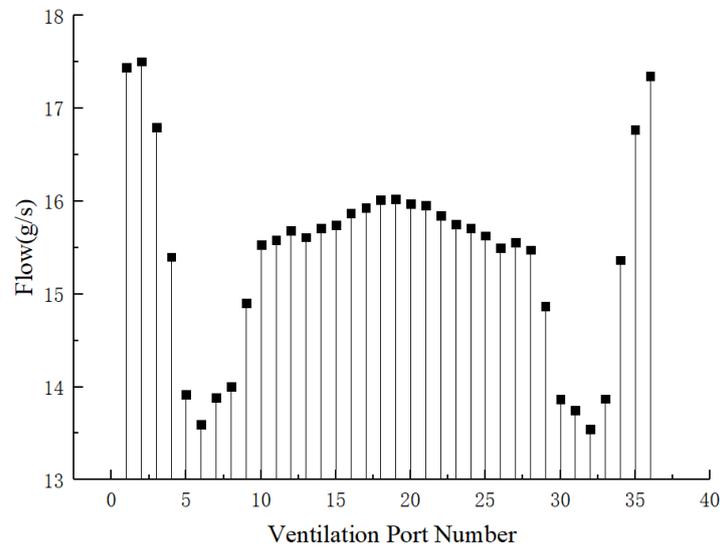


Fig. 7. Drawing of the position of ventilation holes in three schemes

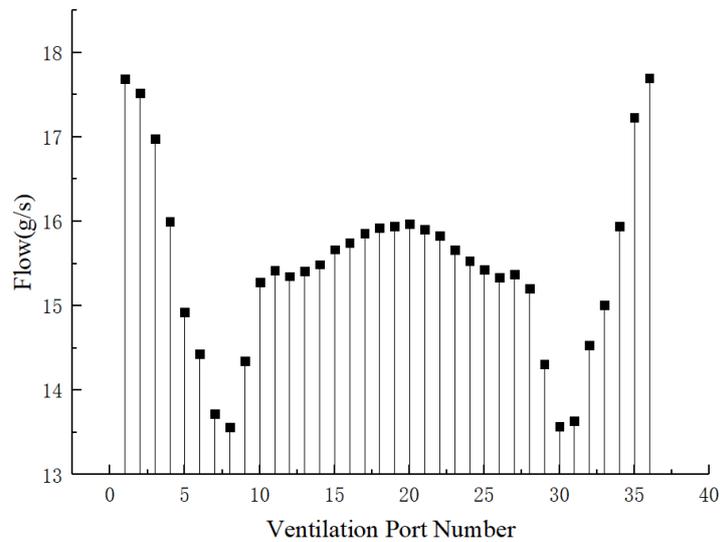
According to the order of the number of ventilation holes, the stator ventilation holes are named, and the flow rate at the entrance of each ventilation hole is intercepted for comparative analysis. Fig. 8 shows the flow distribution of each vent in three schemes.



(a) Scheme 1



(b) Scheme 2



(c) Scheme 3

Fig. 8. Circumferential Inlet Flow Distribution of Stator Ventilation Hole

The air flow distribution trends of the three schemes are basically the same. Unlike the original model, the flow distribution of the three schemes is positive to the intake and the flow near one side is larger than that far from the other side. Changing the position of the vent has no effect on the flow rate of the vent far from the intake side, but increases the flow rate near the intake side.

According to the temperature distribution of the stator winding of the original model, the stator winding with the highest temperature value is intercepted for analysis [10]. From the observation of Fig. 10, it can be seen that the three schemes have the same temperature rising trend and the same position of the highest point, all occurring at the axial length of 0.017 m. The highest temperature along the axis of the first scheme is 146 °C, the highest temperature in the second scheme is 143 °C, the highest temperature in the third scheme is 135 °C, and the highest temperature along the axis of the original model is 147 °C. It can be seen that the ventilation and heat dissipation effect of the three pairs of stator windings is relatively optimal, and the temperature of the highest temperature point is 12 °C less than that of the original model.

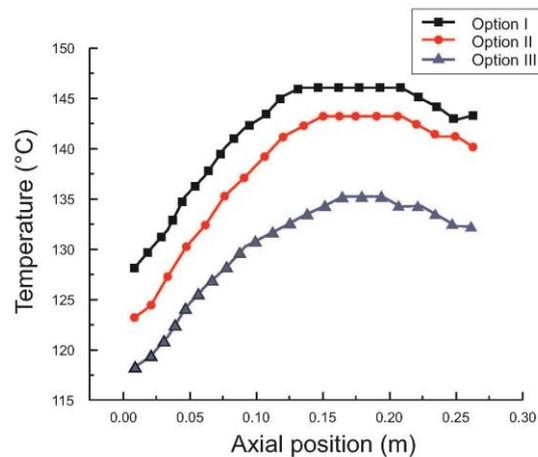
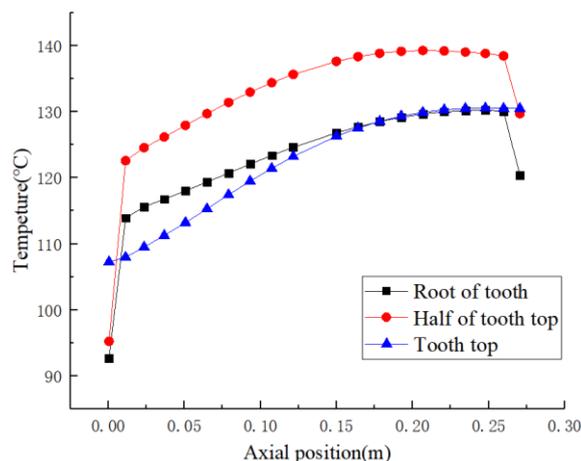
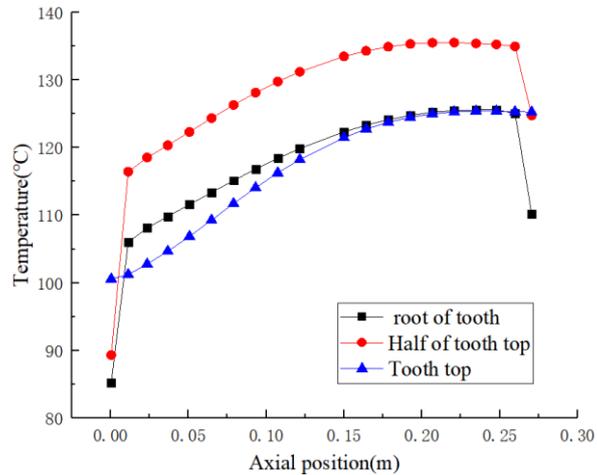


Fig. 9. Temperature profile of the stator winding along the axial direction

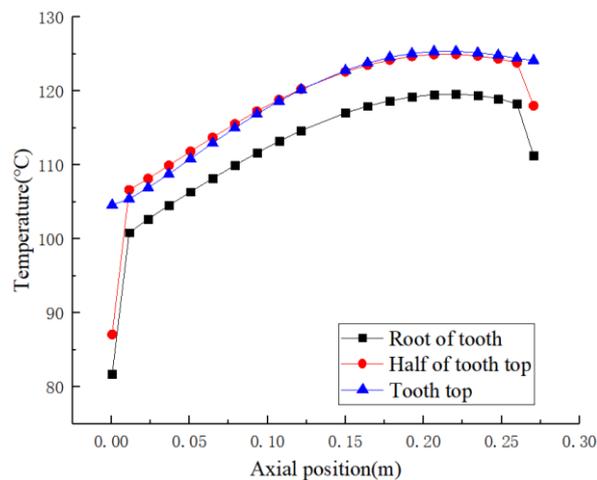
Select stator teeth that are facing air inlet and away from one side to analyze temperature change of tooth along axial direction.



(a) Scheme 1



(b) Scheme 2



(c) Scheme 3

Fig. 10. Temperature Change Diagram of Stator Tooth along Axis

The maps show that the change trend of tooth temperature of the three schemes is the same as that of the original model. The maximum temperature of the tooth top of the original model is 176.73 °C, the maximum temperature of the tooth top 1/2 is 182.76 °C, and the maximum temperature of the tooth root is 179.38 °C. In the first scheme, the maximum temperature of the top of the tooth is 130.57°C, the maximum temperature of the top 1/2 is 139.29 °C, and the maximum temperature of the root is 130.28°C. The maximum temperature of the second tooth top is 125.41°C, the maximum temperature of the top 1/2 is 135.52 °C, and the maximum temperature of the root is 125.59 °C. The maximum temperature at the top of the third tooth is 125.36 °C, 124.95 °C at the top 1/2 and 119.58 °C at the root of the third tooth.

### 3.2. Effect of different incident angles of fluid on fluid and temperature of motor

On the basis of the above, the influence of the inclined angle and direction of the intake port on the fluid and temperature field of the motor is studied, and a scheme is put forward [11].

Table 3. A Scheme of Changing the Inclination Angle of the Inclination Direction of the Inlet

Scheme	1	2	3	4
Inclination direction	stator	stator	cap	cap
Inclination angle	5°	10°	5°	10°

The nomenclature of stator ventilation holes is consistent with the basic model. According to the order of ventilation holes, the entrance flow of each ventilation hole is intercepted and analyzed separately, as shown in Fig. 11.

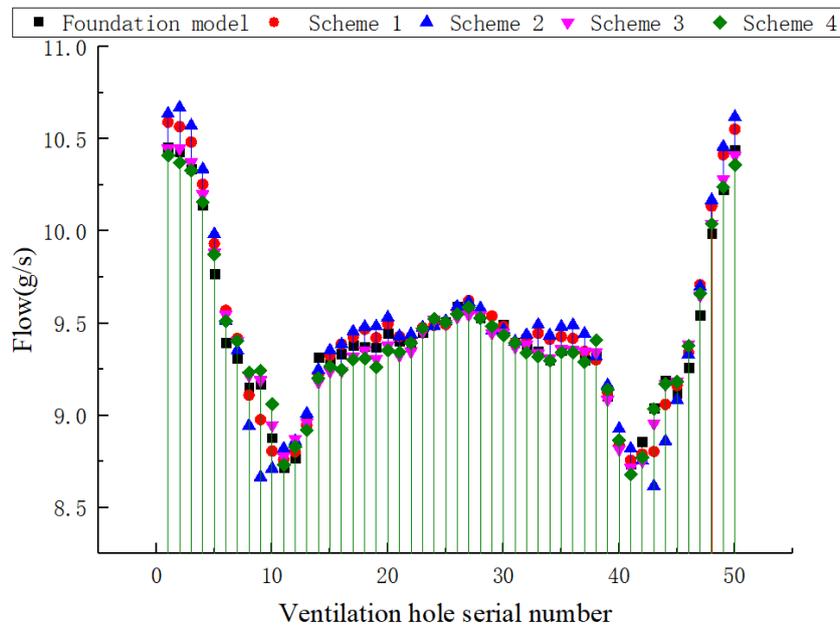


Fig. 11. Contrast Chart of Inlet Flow of Stator Ventilation Hole

From Fig. 11, it can be seen that changing the inclined direction and angle of the intake has little effect on the flow distribution of stator vents. The flow rate of the intake orifice is more than that of the basic model. The flow rate of the No. 1 vent is 0.14 g/s higher than that of the original model, but the flow rate of No. 8, No. 9, No. 10, No. 42 and No. 43 is lower than that of other schemes. The flow rate of No. 26 vent and other schemes is higher than that of the original model. Similarly, the flow rate near the No. 26 vent increased.

### 3.3. Contrastive Study on Temperature Field of Motor

Through fluid-solid coupling calculation, the temperature distribution inside the motor under each scheme is obtained.

*Table 1. Temperature Distribution in Motor*

°C	Winding	Stator yoke	Stator tooth	Slot insulation
Original	146.67	137.68	145.57	148.35
Scheme 1	128.07	119.42	126.7	129.38
Scheme 2	127.59	119.21	126.42	129.09
Scheme 3	125.52	118.34	125.24	127.7
Scheme 4	129.38	120.27	127.38	130.15

By comparing the stator windings of the above schemes, it can be seen that the stator winding temperature of scheme 3 is the lowest in all schemes, which is 4.73 °C lower than the basic model and 21.15 lower than the original model. The four schemes have the same temperature at the stator yoke and the tooth. The temperature value of the three yokes of the scheme is 2.02 °C lower than that of the basic model, and the temperature value of the tooth is 2.93 °C lower than that of the basic model. The insulation temperature of the observation tank shows that the temperature values of scheme 1 and scheme 2 are very close. The difference between scheme 4 and the basic model is very small. Scheme 3 has the lowest temperature, which is 3.27 °C lower than that of the basic model and 20.65 °C lower than that of the original model. The temperature of each scheme in the core part of the rotor is similar, of which scheme 4 has the lowest temperature and scheme 3 has the highest temperature, and its temperature value is close to the basic model. Therefore, from the angle of reducing the temperature rise of stator winding, the third scheme is the best choice.

#### 4. CONCLUSION

The research work and results of this paper are as follows.

1) The wind speed near the intake side of stator teeth and rotor teeth groove is less than that far from the intake side. The flow distribution trend of rotor vent is similar to that of stator vent, but the air in the groove is affected by centrifugal force of rotor rotation, which makes the wind speed difference on the intake side larger than that on the outlet side.

2) The stator winding and rotor guide bar are affected by wind temperature to reach the maximum temperature at the end of the outlet respectively. The stator core is higher at the windward side and the leeward side than the other parts of the motor. The heat dissipation effect at both ends is good. The highest temperature of the stator core appears near the leeward side.

**The authors make it expressly clear that:**

1. No conflict of interests has taken or make take place;
2. The present article does not contain any researches with people involved as the objects of researches.

## References / 参考

1. Kim DG, Kim SC. A Study on the Enhancement of the Cooling Structure for In-wheel Motor Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers. *The Korean Society of Automotive Engineers*. 2013;21(1):36-42. doi: 10.7467/ksae.2013.21.1.036
2. Mugglestone J, Pickering S J, Lampard D. Prediction of the heat transfer from the end winding of a TEFC strip-wound induction motor [C]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99. Proceedings (Cat. No.99EX272) 1999:671-681. doi: 10.1109/iemdc.1999.769153
3. Mayle RE, Hess S, Hirsch C, et al. Rotor-stator gap flow analysis and experiments [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1998;13(2):101-110. doi: 10.1109/60.678972
4. Lu X, Hu J, Zhao C. Analyses of the temperature field of traveling-wave rotary ultrasonic motors.[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*. 2011;58(12):2708-19. doi: 10.1109/tuffc.2011.2133
5. Valenzuela MA, Reyes P. Simple and reliable model for the thermal protection of variable speed self-ventilated induction motor drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010;46(2):770-778. doi: 10.1109/tia.2009.2039842
6. Mroz J. Temperature field of a double squirrel-cage motor during startup [J]. *IEEE Proceedings - Electric Power Applications*. 2005;152(6):1531-1538. doi: 10.1049/ip-epa:20045219
7. Cummings PG. Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1986;IA-22(6):1121-1126. doi: 10.1109/tia.1986.4504843
8. Bennion K, Cousineau J. Sensitivity analysis of traction drive motor cooling [C]. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). 2012:1-6. doi: 10.1109/itec.2012.6243512
9. Mendes AMS, Lopez-Fernandez XM, Cardoso JM. Thermal evaluation of TEFC three-phase induction motors under different supply frequencies [C]. 18<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines. 2008:1-6. doi: 10.1109/icelmach.2008.4800075
10. Hruska K, Kindl V, Pechanek R, et al. Evaluation of different approaches of mathematical modelling of thermal phenomena applied to induction motors [C]. 2014 ELEKTRO IEEE. 2014:358-362. doi: 10.1109/elektro.2014.6848918
11. Nair DG, Jokinen T, Arkkio A. Coupled analytical and 3D numerical thermal analysis of a TEFC induction motor [C]. 18<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2015. doi: 10.1109/icems.2015.7385008

### Information about the authors:

**Weili Li**, Doctor of Engineering Sciences, Professor;  
ORCID: 0000-0003-4316-9642; Scopus Author ID: 8683345900;  
E-mail: wlli@bjtu.edu.cn

**Junci Cao**, Doctor in Engineering, Associate professor;  
ORCID: 0000-0003-1373-839X; Scopus Author ID: 35214365100;  
E-mail: jccao@bjtu.edu.cn

**Dong Li**, Doctor in Engineering, Lecturer;  
ORCID: 0000-0002-2359-9648; Scopus Author ID: 56610865300;  
E-mail: donglz223624@126.com

**Zhigang Wu**, doctoral candidates;  
ORCID: 0000-0003-1373-839X; Scopus Author ID: 57197774861;  
E-mail: sdwuzhigang@163.com

**有关作者的信息:**

**李伟力**, 工学博士, 教授;  
ORCID: 0000-0003-4316-9642; Scopus Author ID: 8683345900;  
E-mail: wlli@bjtu.edu.cn

**曹君慈**, 工学博士, 副教授;  
ORCID: 0000-0003-1373-839X; Scopus Author ID: 35214365100;  
E-mail: jccao@bjtu.edu.cn

**李栋**, 工学博士, 讲师;  
ORCID: 0000-0002-2359-9648; Scopus Author ID: 56610865300;  
E-mail: donglz223624@126.com

**吴志刚**, 博士研究生;  
ORCID: 0000-0003-1373-839X; Scopus Author ID: 57197774861;  
E-mail: sdwuzhigang@163.com

**To cite this article:**

Li W, Wu Z, Cao J, Li D. Study on Heat Exchange of Different Ventilation Structures of Asynchronous Traction Motor for High Speed EMU. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2): 16-30. doi: 10.17816/transsyst20195216-30

**引用这篇文章:**

李伟力, 曹君慈, 李栋, 李栋. 高速动车组异步牵引电机不同通风结. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):16-30. doi: 10.17816/transsyst20195216-30

## Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление «Физика конденсированного состояния»

УДК [UDC] 621.774.37:539.319

DOI 10.17816/transsyst20195231-46

© В.П. Коржов, В.Н. Зверев

Институт физики твердого тела РАН

(Черноголовка, Московская обл., Россия)

### МНОГОСЛОЙНАЯ СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ ЛЕНТА СПЛАВА Nb50Ti, ПОЛУЧЕННАЯ ИЗ КОМПОЗИТА Cu/Nb/Ti ТВЕРДОФАЗНЫМ СПОСОБОМ

**Цель:** Создание многослойной сверхпроводящей ленты из ниобий-титанового сплава.

**Методы:** Методами диффузионной сварки и пакетной прокатки за два цикла изготовлены опытные образцы многослойной ленты на основе сверхпроводящего сплава Nb–50%Ti. В качестве стабилизатора сверхпроводящего состояния проводника использовалась медь. На начальном этапе из фольг ниобия и титана собирался многослойный пакет Nb/Ti. Медные стабилизирующие слои закладывались в пакет во 2-м цикле изготовления ленты. Взаимодействие между ниобием и титаном происходило, в основном, за счет диффузии ниобия в слои титана с образованием на их месте сплава Nb–50%Ti.

**Результаты:** Измерения критического тока  $I_c$  при параллельной и перпендикулярной ориентации магнитного поля относительно плоскости слоев в композите показали большую анизотропию  $I_c$ , что было результатом закрепления сверхпроводящих вихрей преимущественно на границах NbTi-сплава и Nb-твердого раствора. В целом композит был способен проводить большой электрический ток в магнитных полях 5–6 Тесла без длительного низкотемпературного отжига для выпадения  $\alpha$ -фазы, который необходим в случае композитов из ниобий-титановых сплавов, получаемых по известной технологии.

**Ключевые слова:** сверхпроводящая лента, многослойный композит, сплав Nb–Ti, твердофазный способ, взаимная диффузия, пакетная прокатка, критический ток, сверхпроводящий вихрь, пиннинг.

## Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

### Field “Condensed matter physics”

© Valery P. Korzhov, Vladimir N. Zverev

Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences  
(Chernogolovka, Moscow Oblast, Russia)

### MULTILAYER SUPERCONDUCTING Nb50Ti ALLOY TAPE, OBTAINED FROM THE COMPOSITE Cu/Nb/Ti THROUGH SOLID-PHASE METHOD

**Aim:** Creation of multilayer superconducting tape made of Nb-Ti alloy.

**Methods:** Using the methods of diffusion welding and packet rolling, for two cycles the prototypes of a multilayer tape based on a superconducting Nb–50% Ti alloy were made. Copper was used as a stabiliser of the superconducting state of the conductor. At the initial stage, a multilayer Nb-Ti pack was assembled from niobium and titanium foils. Copper stabilising layers were laid in the pack in the 2<sup>nd</sup> cycle of tape manufacturing. The mutual diffusion between the Nb- and Ti-layers took place generally at the expense of niobium diffusing into the layers of titanium, with the Nb-50 % Ti alloy emerging in their place.

**Results:** Measurements of the critical current  $I_c$  with a perpendicular and parallel orientation of the magnetic field relative to the plane of the layers in the composite showed large anisotropy of  $I_c$ , which was the result of the superconducting vortices fixing exclusively at the boundaries of the Nb-Ti-alloy and the Nb-solid solution. In general, the composite was capable of carrying large current in magnetic fields of 5-6 T without long-lasting low-temperature annealing for  $\alpha$ -phase deposition, which is necessary in the case of Nb-Ti alloy composites produced by the known technology.

**Keywords:** superconducting tape, multilayer composite, Nb–Ti alloy, solid-phase method, mutual diffusion, batch packet rolling, critical current, superconducting vortex, pinning.

### ВВЕДЕНИЕ

Интенсивность исследований сверхпроводящих сплавов ниобий-титан приходится на период 1960–1970-х годов. В те годы проблеме сверхпроводящих сплавов вообще и NbTi, в частности, посвящались регулярные конференции, проводимые в ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН. Развитие этих исследований можно проследить в издаваемых в те годы сборниках статей конференций, а также двух сборниках статей ведущих научных коллективов страны под редакцией член-корреспондента АН СССР Е.М. Савицкого и его коллег [1–7]. В СССР эти исследования воплотились в разработку промышленной технологии получения многожильных сверхпроводящих материалов на основе сплава Nb–50Ti, пережившей, уже в XXI-м веке, свое новое возрождение. Но в настоящее

время исследовательские работы по сверхпроводящим сплавам NbTi почти не ведутся.

Исследуя целый ряд многослойных материалов, получаемых с помощью пакетной прокатки, на предмет зависимости их механических свойств от толщины слоев, нами были получены композиты ниобия со сверхпроводящими сплавами Nb–31 и 50 мас.%Ti – Nb/Nb31Ti и Nb/Nb50Ti [8, 9]. Целью было измерить критическую плотность тока  $j_c$  в зависимости от толщины слоев (Nb–Ti)-сплавов. Оказалось, что зависимость  $j_c(t)$ , где  $t$  – толщина слоя сверхпроводника, подчинялась соотношению Холла-Петча, если прочность  $\sigma$  заменить критической плотностью тока, а размер зерна – толщиной сверхпроводящего слоя.

Что касается сверхпроводимости выбранных композитов, то известно, что в сверхпроводниках 2-го рода критическая плотность тока  $j_c$  зависит от того, насколько эффективно сверхпроводящие вихри будут закрепляться на дефектах структуры, то есть  $j_c$  является такой же, а может быть в большей степени, как и твердость или прочность, структурно-зависящей характеристикой материала. В.В. Шмидт [10] при теоретическом рассмотрении взаимодействия вихрей с плоской поверхностью сверхпроводника показал, что даже бездефектные сверхпроводящие пластины толщиной  $d \gg \lambda$  ( $\lambda$  – глубина проникновения внешнего магнитного поля) в смешанном состоянии способны нести значительный ток  $\sim 10^5$  А/см<sup>2</sup>. Теперь представим, что толстая пластина заменена набором тонких сверхпроводящих пластин, искусственно отделенных друг от друга слоем нормального металла. В этом случае ток будет течь по каждой из пластин, и в целом по всему сечению многослойного сверхпроводника будет идти большой ток. Именно такая ситуация была реализована сначала в многослойных композитах Cu/Nb [11], а потом Nb/NbTi [8, 9]. В первом из них слои из сверхпроводящего ниобия разделялись слоями нормальной меди. Роль нормального металла во 2-м композите выполнял ниобий, так как измерения критических токов сверхпроводящих лент из (Nb–Ti)-сплавов проводились в магнитных полях, во много раз превышавших его второе критическое магнитное поле.

Доказательством эффективного закрепления сверхпроводящих вихрей на протяженных границах между слоями ниобия и меди или слоями ниобия и сплава Nb–Ti была анизотропия  $j_c$ , измеренная при параллельной ( $\parallel$ ) и перпендикулярной ( $\perp$ ) ориентациях плоскости слоев композита и магнитного поля  $j_{c\parallel}/j_{c\perp}$ . В композите Nb/Cu  $j_{c\parallel}/j_{c\perp} = 410$  в полях 0,5–0,6 Тл [11]. В Nb/NbTi в полях 5–6,5 Тл анизотропия увеличивалась с 3–5, для композитов со слоями толщиной  $\sim 140$  нм, до 235 для композитных лент с толщиной слоев  $\sim 3$  нм. В отдельных же случаях отношение  $j_{c\parallel}/j_{c\perp}$  превышало 2000 [8, 9].

В данной работе для получения сверхпроводника из сплава NbTi предлагается обходиться без использования плавильного способа гарниссажной плавки – достаточно дорого и трудоемкого процесса. Формирование сплава Nb–50%Ti будет происходить в процессе двух циклов, состоящих из диффузионной сварки и пакетной прокатки, с использованием на начальном этапе Nb/Ti-пакетов с фольгами из чистых металлов.

Надо заметить, что прокатка пакетов оказывает положительное влияние на формирование слоя NbTi-сплава. В процессе прокатки внутри слоистого композита, который вытягивается в длину в несколько раз, высвобождаются атомно чистые, так называемые, ювенильные поверхности соприкасающихся однородных и разнородных металлов [12]. При прокатке эти поверхности сближаются на расстояния действия межатомных сил, и в результате образования металлических связей происходит их сцепление. При пластических деформациях это явление называется схватыванием. Способность металлов к схватыванию является физическим свойством ювенильных поверхностей. В идеальных условиях термодинамики схватывание является выгодным процессом и должно происходить самопроизвольно, так как энергия системы из соединенных металлов становится меньше за счет ликвидации свободных поверхностей. Под идеальными условиями понимается сближение поверхностей, свободных от окисных и адсорбированных пленок на расстояние, равное сумме радиусов атомов соединяемых поверхностей. Предпринимаемая прокатка и является одним из способов получения ювенильных поверхностей.

В нашем же случае образование ювенильных поверхностей полезно ещё и тем, что через них более беспрепятственно осуществлялась взаимная диффузия разнородных атомов по сравнению с тем, если бы прокатка не предпринималась.

## **Методика получения и исследования структуры проводника**

### ***Диффузионная сварка пакетов и пакетная прокатка.***

Для получения сверхпроводящей ленты на основе сплава Nb–Ti использовались диффузионная сварка (ДС) многослойных пакетов (рис. 1) под давлением в вакууме и последующая их пакетная прокатка (ПП) при комнатной температуре.

ДС пакетов проводилась в вакууме не ниже, чем  $10^{-4}$  мм рт. ст. Свариваемый пакет располагался между пуансонами, изготовленными из высокопрочного графита. Между пакетом и пуансонами прокладывались фольги из терморасщепленного графита (ТРГ) толщиной 0,3 мм. В 1-м цикле сварка Nb/Ti-пакетов проходила при  $1050^{\circ}\text{C}$  в течение 10 мин под

давлением 16–17 МПа. Во 2-м цикле сваривались пакеты, содержавшие наружные и внутренние прокладки из меди, и, поэтому, температура ДС снижалась до 900–950°C при давлении 17–19 МПа, а время сварки повышалось до 1,5–2 ч.

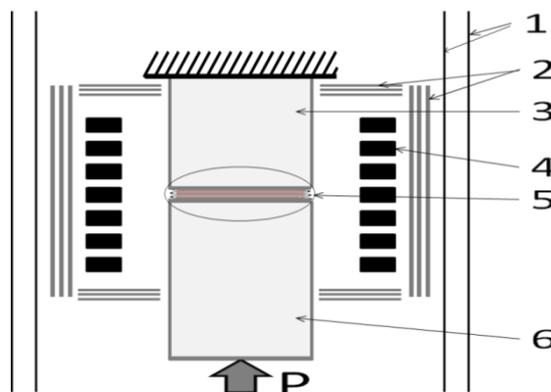


Рис. 1. Взаимное расположение основных узлов установки для ДС:

1 – водоохлаждаемый корпус камеры, 2 – набор тепловых экранов из прессованной графитовой ваты и Мо-фольги, 3 – неподвижный пуансон, 4 – нагреватель из высокопрочного графита, 5 – испытуемый пакет, 6 – подвижный пуансон, P – усилие

Деформация прокаткой сваренных пакетов проводилась при комнатной температуре на 4-х валковом стане тонкой прокатки. Степень деформации за проход составляла 2–3%. Направление прокатки пакетов соответствовало направлению прокатки заложенных в пакеты Nb- и Ti-фольг. В 1-м цикле лента прокатывалась до толщины 0,2–0,25 мм, разрезалась на отрезки нужной длины, из которых собирался новый пакет требуемой конструкции для 2-го цикла. После 2-го цикла сваренный пакет прокатывался до ленты конечной толщины – 0,1 мм.

**Исследование структуры материала.** Микроструктура композитов исследовалась с помощью растровой электронной микроскопии и рентгеновского спектрального анализа (РСА). Исследования, включающие получение изображений объектов во вторичных и отраженных электронах и РСА, выполнялись на цифровых электронных сканирующих микроскопах Tescan VEGA-II XMU и CamScan MV230 (VEGA TS 5130MM). Оба микроскопа имеют W-катоды, оснащены YAG-детекторами вторичных и отраженных электронов и рентгеновским микроанализатором.

Исследования выполнялись при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе электронного зонда 200 пА на образце кобальта. Размер электронного зонда – 0,16 мкм. Глубина области характеристического рентгеновского излучения достигала 5–6 мкм. На горизонтальном разрезе это

соответствовало кругу, а в объеме – грушевидной зоне с наибольшим диаметром около 10 мкм.

### Структура многослойных композитов

**Сборка пакетов.** Сверхпроводящую многослойную ленту из сплава Nb–50%Ti, стабилизированную медью, получали за два цикла, каждый из которых состоял из диффузионной сварки и пакетной прокатки.

Сборка пакетов в 1-м цикле проводилась из элементов U-образной формы, изготавливаемых заранее из фольг ниобия и титана, и отдельных фольг титана и ниобия [13]. Соблюдая определенную последовательность, можно было относительно просто и быстро собирать пакеты из десяти, двадцати и более ниобиевых элементов, чередующихся с Ti-фольгами, или титановых элементов, чередующихся с Nb-фольгами. Пакет представлял собой единую конструкцию, благодаря чему с ним можно было производить нужные технологические процедуры. Отдельные составляющие исходных пакетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Составляющие Nb/Ti-пакетов в 1-м цикле ДС и ПП

Обозначение пакета	Составляющие пакетов: количество (шт.) и толщина (t) фольг	Общее кол-во фольг в пакете, шт.
13TiNb1	1. 20 U-элементов из Ti-фольги t = 45 мкм 2. 39 Nb-фольг t = 45–50 мкм	40 39
13NbTi2	1. 20 U-элементов из Nb-фольги t ≈ 50 мкм 2. 39 Ti-фольг t = 45 мкм	40 39
13TiNb3	1. 10 U-образных элементов из Nb-фольги + 10 Nb-фольг t ≈ 50 мкм 2. 11 U-образных элементов из Ti-фольги + 9 Ti-фольг t = 45 мкм	20 + 10 = 30 22 + 9 = 31
13NbTi4	1. 10 U-образных элементов из Ti-фольги + 10 Ti-фольг t = 45 мкм 2. 11 U-образных элементов из Nb-фольги + 9 Nb-фольг t ≈ 50 мкм	20 + 10 = 30 22 + 9 = 31

В 1-м цикле пакеты содержали по 31 и 40 слоев из ниобия и на один меньше слоев из титана или по 31 и 40 слоев из титана и на один меньше слоев из ниобия. Наружными слоями пакетов были только Nb- или только Ti-слои. Толщина пакетов составляла 2,9–3,0 и 3,7–3,8 мм соответственно.

Во 2-м цикле пакеты собирались в определенной последовательности из нескольких отрезков ленты, полученной после 1-го цикла, двух или трех пластин из меди толщиной 0,15 мм и соответственно 2-х или 4-х Nb-фольг толщиной 20 мкм, прокладываемых между медными пластинами и

отрезками после 1-го цикла. Эти Nb-фольги были диффузионными барьерами против взаимодействия меди и титана, находящегося в сплаве Nb–Ti.

Если пластин из меди, как стабилизатора, было две, то они располагались снаружи пакета, если – три, то одна пластина располагалась еще и посередине пакета.

Расчетные толщины отдельных слоев твердого раствора титана в ниобии (Nb) и NbTi-сплава в многослойной ленте конечной толщины составляли ~150 нм.

**Многослойная структура композитов после 1-го цикла.** После 1-й сварки структура Nb/Ti-пакета состояла из чередующихся светлых и темных полос, параллельных друг другу (рис. 2). Светлые полосы соответствовали ниобию, темные – титану.

Точная идентификация слоев проводилась с помощью локального РС-анализа. Концентрационные профили вблизи границы между слоями ниобия и титана (рис. 3, *a* и *b*) показали, что в условиях ДС при 1050°C и относительно небольшом давлении было достаточно 10 минут, чтобы на месте Ti-слоев образовались слои ниобий-титанового сплава. Концентрация Nb в них в направлении от границы к середине слоя уменьшалась в интервале от 44 до 27 мас.%. Концентрация Ti увеличивалась от 56 до 73 мас.%. Кроме того на самой границе между слоями отмечено присутствие диффузных образований с 75–85 мас.%Nb (спектры 7 и 8, см. рис. 3, *a*).

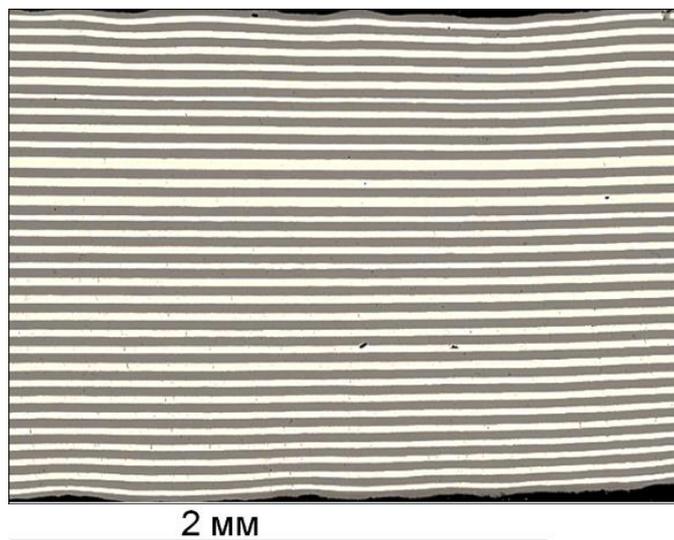


Рис. 2. Макроструктура поперечного сечения пакета Nb/Ti, содержащего 31 Ti-слой и 30 Nb-слоев после ДС в 1-м цикле (см. табл.1, 13TiNb3)

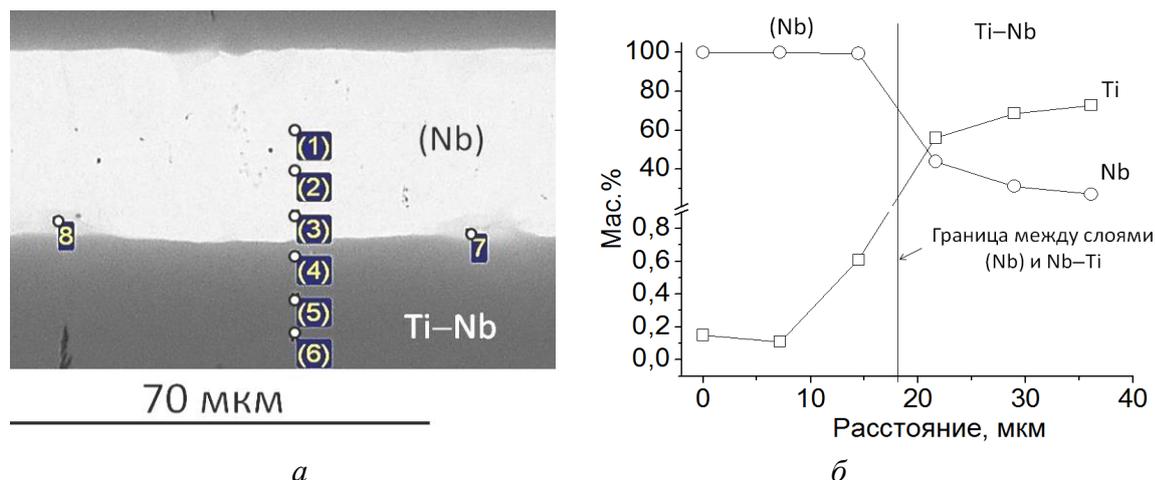


Рис. 3. К результатам локального рентгеноспектрального анализа: фрагмент микроструктуры (а) и концентрационные профили титана и ниобия (б) на границе между слоями из ниобиевого твердого раствора (Nb) и сплава Nb–Ti

Титан же в слоях ниобия растворялся совсем незначительно – в середине Nb-слоя он содержался в количестве меньше 0,2 мас.% (см. рис. 3, б). Это означало, что твердофазное взаимодействие между слоями происходило за счет диффузии ниобия в титан и оказывало положительное влияние на формирование в композите слоистой структуры, одним из слоев которой должен быть слой сверхпроводящего сплава Nb–Ti, близкий к сплаву с 50 мас.%Ti. Сплав Nb–50Ti обладает лучшим сочетанием сверхпроводящих характеристик в системе Nb–Ti. Другими слоями должны быть слои из ниобия с как можно меньшим содержанием титана. Тогда они будут несверхпроводящими уже в малых магнитных полях. Известно [14], что несверхпроводящие дефекты являются более эффективными центрами закрепления сверхпроводящих вихрей, чем сверхпроводящие.

На рис. 4 представлена структура поперечного сечения многослойной ленты толщиной ~0,2 мм после ДС и прокатки. Исходной заготовкой был Nb/Ti-композит  $13\text{NbTi}_2$ , содержащий 40 Nb- и 39 Ti-слоев (см. табл. 1). Светлые слои – это Nb-твердый раствор (Nb), содержащий титан в количестве нескольких десятых долей процента. Темные слои – сплав Nb–(70–80) мас.%Ti. Оказалось, что в направлении поперек прокатки ламинарность слоистой структуры выражена лучше, чем вдоль неё. В сечении, совпадающем с направлением прокатки (см. рис. 4, б), в слоях NbTi-сплава присутствует большое количество образований линзообразной формы.

Расчетные толщины слоев (Nb) и Nb–Ti в прокатанной ленте после 1-го цикла равнялись соответственно 2,7 и 2,4 мкм. Но в действительности их толщина варьировалась от нескольких до 10–15 микрон (см. рис. 4).

Рентгеновский спектральный анализ поперечного сечения ленты (Nb)/Nb–Ti подтвердил предыдущие результаты. Темные слои ниобий-титанового сплава содержали  $\sim 34,5$  мас.%Nb – это средняя концентрация ниобия, рассчитанная по четырем спектрам 2, 3, 4 и 6, приходящихся на слои Nb–Ti (рис. 5).

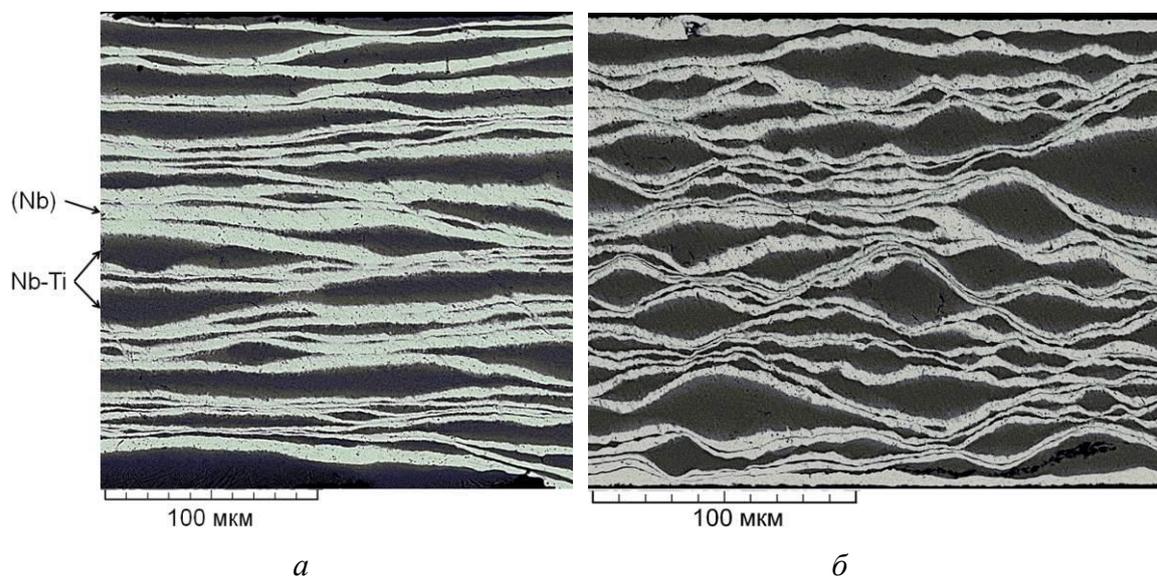


Рис. 4. Микроструктура Nb/Ti-композитной ленты толщиной 0,2 мм после ДС и ПП после 1-го цикла поперек (а) и вдоль прокатки (б).

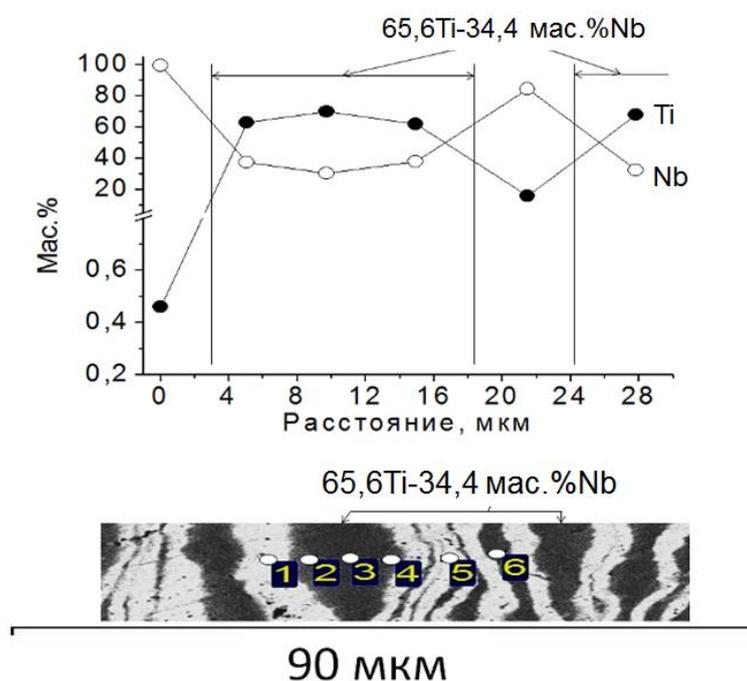


Рис. 5. К результатам локального РСА: концентрационные профили титана и ниобия и фрагмент микроструктуры Nb/Ti-композита  $13\text{NbTi}_2$  после ДС и ПП 1-го цикла

**2-й цикл.** На рис. 6 представлена макроструктура пакета, собранного во 2-м цикле из 9 отрезков ленты после 1-го цикла, и результаты локального РС-анализа, проведенного на одном из участков его сечения при большом увеличении. Рассматриваемое сечение пакета ориентировано параллельно направлению прокатки фольг ниобия и титана.

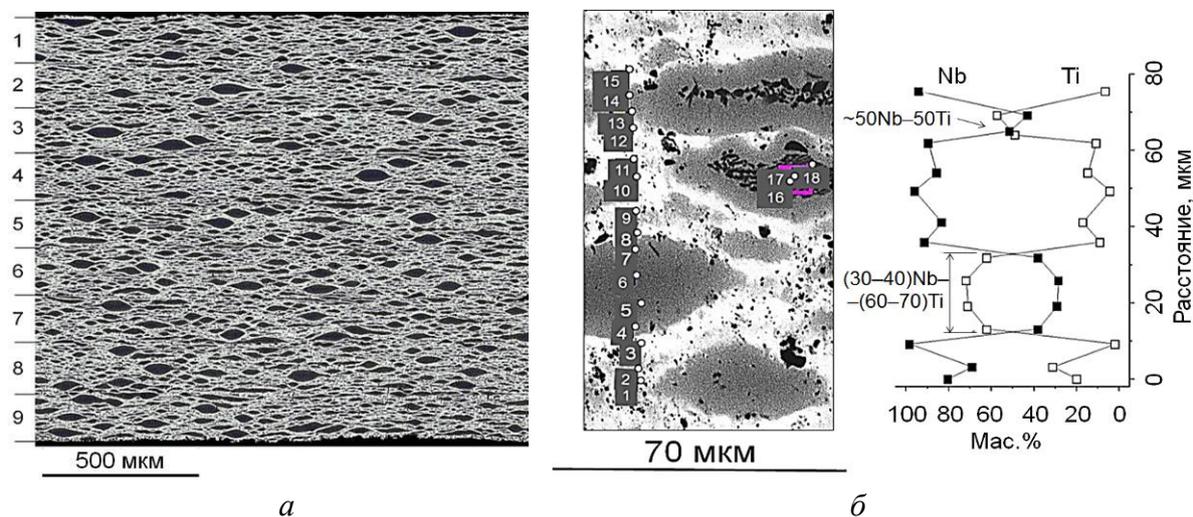


Рис. 6. 2-й цикл: *a* – макроструктура поперечного сечения пакета из 9 отрезков ленты после 1-го цикла; *б* – результаты РСА. ДС: 950°C при 19 МПа в течение 2 ч

При анализе приведенных макро- и микроструктур композита визуально видно, что слоистый характер ее определяется светлой компонентой материала, в которой содержание титана в лучшем случае не превышает 10–15 мас.%. Значительно чаще его содержится в ней от 1 до 3–4 мас.%. Эта компонента создает связную непрерывную систему. Компонента серого цвета из ниобиевого сплава с содержанием титана 50–70 мас.% образует вытянутые включения, приобретающие нередко дискообразную форму и, поэтому, кажущиеся прерывистыми. Отсюда напрашивается ошибочный вывод, что сплав ниобия, ответственный за высокий сверхпроводящий ток проводника, не имеет связных токовых путей.

В средней области некоторых утолщений отмечено присутствие включений, отличающихся от окружающего объема своим черным цветом (спектры 16–18, см. рис. 6, *б*). Они обогащены титаном. Их состав: 21–24Nb и 79–76 мас.%Ti.

### Измерения критического тока

Низкотемпературные измерения проводились на лентах, полученных прокаткой композитов из отрезков многослойной ленты после 1-го цикла, Си-полос как стабилизатора и тонких Nb-фольг, прокладываемых между

отрезками после 1-го цикла и медью. Структуры двух таких композитов, ещё не подвергавшихся прокатке, показаны на рис. 7. Первый состоит из семи многослойных отрезков (Nb)/Nb–Ti, двух наружных Cu-обкладок и двух Nb-прослоек. Второй композит, кроме двух наружных, содержит еще внутренний Cu-слой, две пачки из сложенных вместе 4-х многослойных отрезков (Nb)/Nb–Ti и четыре Nb-прослойки, которые расположены между Cu и (Nb)/Nb–Ti. Проводящие сверхпроводящий ток объемы с 2-фазной слоистой структурой (Nb) + Nb–Ti в 1-м и 2-м композитах составляют 79,6 и 75,3 об. %.

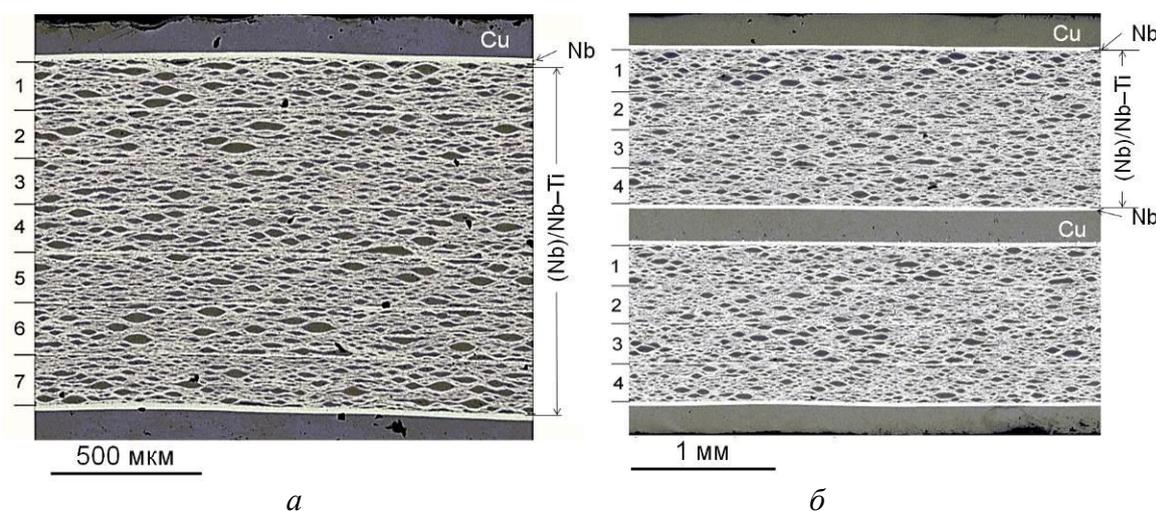


Рис. 7. Структура композитов после ДС во 2-м цикле:

- а* – 2 Cu-слоя, 2 Nb-прослойки и 7 отрезков ленты (Nb)/Nb–Ti после 1-го цикла;  
*б* – 3 Cu-слоя, 4 Nb-прослойки и 2 пачки по 4 отрезка (Nb)/Nb–Ti

Концентрационные профили ниобия и титана свидетельствовали, что в объеме (Nb)/Nb–Ti слои из чистого титана отсутствуют. Наибольшее содержание титана, ~70 мас.%, было в дискообразных структурных образованиях (спектры 4, 5, 6 и 7, см. рис. 6, б). Другие участки слоев сплава Nb–Ti выглядят светло-серыми по контрасту. Это есть доказательство того, что содержание ниобия в них больше, чем в спектрах 4–7. И, действительно, спектры 13 и 14 показывают ~50 мас.%Nb и ~50 мас.%Ti.

В слоях светлого контраста, идентифицированных как Nb-твердый раствор, концентрация титана в лучшем случае не превышала 20, а часто оставалась на уровне нескольких мас.%. Резюмируя вышесказанное, можно констатировать, что твердофазное взаимодействие между ниобием и титаном происходит, в основном, за счет диффузии ниобия в титановые слои.

**Измерение критического тока.** Низкотемпературные измерения проводились на образцах ленты, полученных прокаткой композитов, приведенных на Рис. 7. Их микроструктура после прокатки показана на

рис. 8. В отличие от структуры композита до прокатки, слоистая структура представляется состоящей из непрерывающихся слоев NbTi-сплава и твердого раствора (Nb) соответственно серого и светлого контрастов.

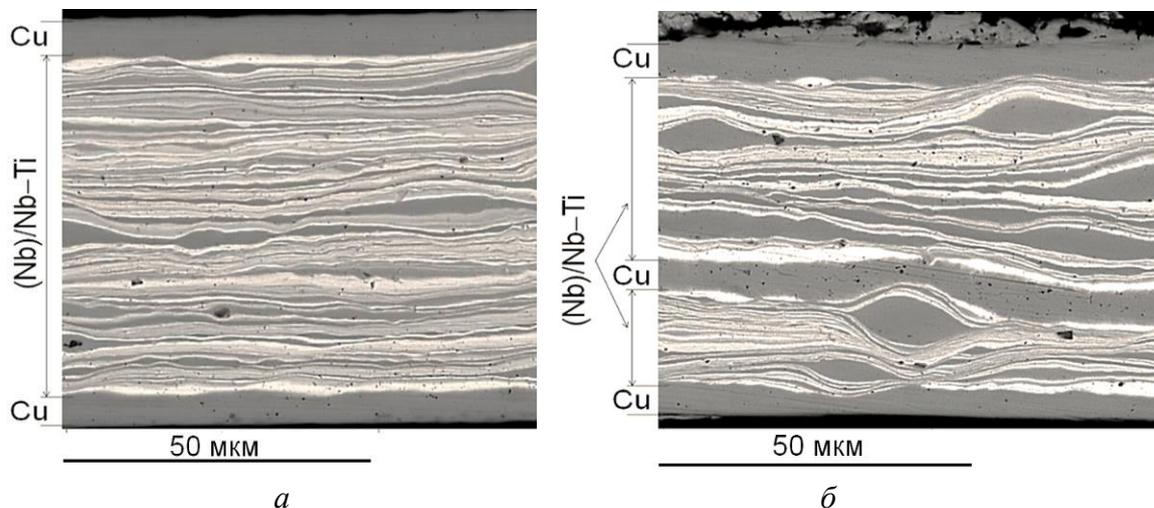


Рис. 8. Микроструктура поперечного сечения многослойной сверхпроводящей ленты на основе сплава Nb–Ti с двумя (а) и тремя (б) стабилизирующими медными слоями

Образцами для измерения критического тока  $I_c$  служили отрезки многослойной ленты после 2-го цикла ДС и ПП толщиной 0,1 мм и шириной 1 мм. Измерения проводились в криостате с жидким гелием в магнитном поле  $H$ , создаваемом сверхпроводящим соленоидом, при перпендикулярной  $H \perp (ab)$  и параллельной  $H \parallel (ab)$  ориентациях направления магнитного поля  $H$  и плоскости прокатки ленты (ab) (рис. 9). Транспортный ток  $I$  через образец в обоих случаях был перпендикулярен магнитному полю соленоида:  $I \perp H$ .

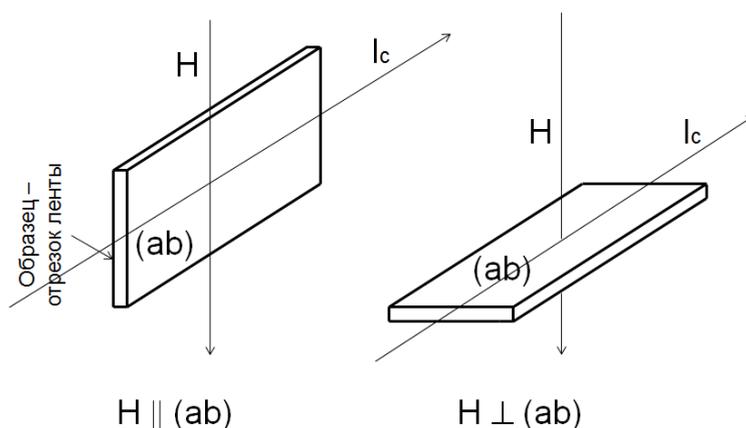


Рис. 9. Две ориентации образца относительно поля  $H$  сверхпроводящего соленоида

На Рис. 10 представлены вольт-амперные характеристики многослойной ленты в полях 1, 3 и 5 Тл и  $H \parallel (ab)$  и зависимости

критического тока  $I_c$  от магнитного поля  $H$  при  $H \parallel (ab)$  и  $H \perp (ab)$ . Две экспериментальные точки со “стрелками вверх” указывают на то, что транспортный ток такой силы не разрушил сверхпроводящее состояние образца.

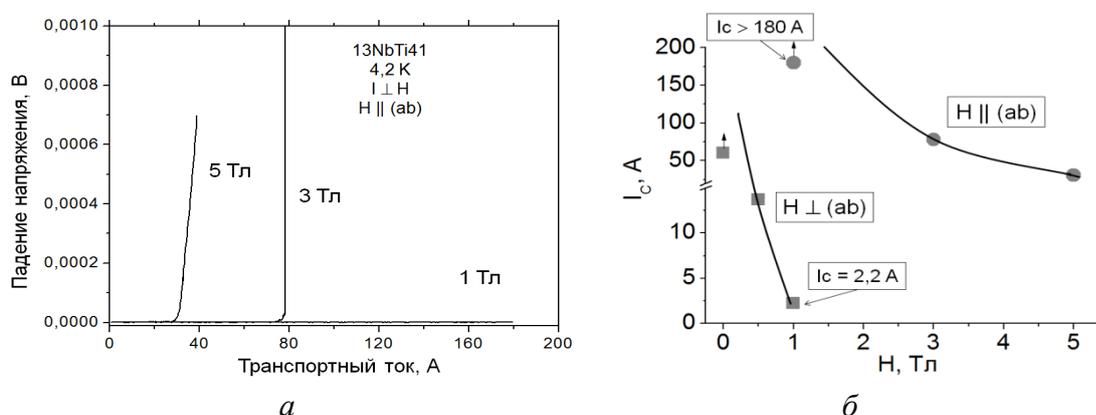


Рис. 10. Вольт-амперные характеристики многослойной сверхпроводящей ленты из сплава Nb–Ti при  $H \parallel (ab)$  и  $H = 1, 2$  и  $3$  Тл (а) и зависимости  $I_c(H)$  при  $H \parallel (ab)$  и  $H \perp (ab)$  (б)

При  $H \perp (ab)$   $I_c$  резко падал с увеличением поля уже в диапазоне от 0 до 1 Тл (см. Рис. 10 б). В то время как при ориентации  $H \parallel (ab)$  он плавно понижался, оставаясь при 5 Тл на уровне  $\sim 30$  А, что соответствует инженерной (конструктивной) критической плотности тока, равной  $3 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup>. Анизотропия  $I_c$ , равная отношению  $I_{c\parallel}/I_{c\perp}$ , рассчитанная для  $H = 1$  Тл, была  $>82$ . Это свидетельствует о закреплении сверхпроводящих вихрей, локализуемых в сплаве Nb–Ti, на границах между несверхпроводящими слоями Nb-твердого раствора (Nb) и сплава Nb–Ti, несущего сверхпроводящий ток.

Важно отметить, что такие значения плотности тока достигались в лентах без длительных, порядка 300–350 часов, низкотемпературных отжигов при 300–350°C. Такие отжиги требуется проводить для широко используемых многожильных и многослойных сверхпроводящих материалов (Nb–Ti)/Cu. Это делается для выпадения частиц  $\alpha$ -фазы, на которых, в отличие от рассмотренных в работе композитов, происходит закрепление сверхпроводящих вихрей.

### Заключение и выводы

1. На основании проведенного РС-анализа можно сделать заключение, что в многослойном композите Nb/Ti в результате твердофазного взаимодействия между фольгами ниобия и титана в процессе диффузионной сварки за два цикла, состоящих из диффузионной

сварки и пакетной прокатки, получены слои сверхпроводящего (Nb–Ti)-сплава состава Nb50Ti.

2. Слои сплава Nb50Ti, имея наиболее высокое второе критическое магнитное поле, способны проводить большой электрический ток в магнитных полях 5 и более Тесла. Прослойки Nb-твердого раствора с содержанием титана до 5–10 мас.% переходят в нормальное состояние уже в малых магнитных полях и создают границы (Nb)-NbTi, являющиеся эффективными центрами закрепления сверхпроводящих вихрей. Это подтверждается большой анизотропией критического тока:  $I_{c\parallel}/I_{c\perp} > 82$  в магнитном поле 1 Тл.

3. В многожильных сверхпроводниках из (Nb–Ti)-сплава промышленного изготовления центрами закрепления являются частицы  $\alpha$ -фазы, выделяющиеся при длительном низкотемпературном отжиге уже готовых изделий. В композитном сверхпроводящем материале Cu/Nb/NbTi твердофазного изготовления, в котором закрепление вихрей происходит на границах (Nb)-NbTi, высокая критическая плотность тока достигалась без отжига.

#### Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей или животных в качестве объектов исследований.

#### Библиографический список / References

1. Труды I совещания по металлосведению и металлофизике сверхпроводников «Металловедение и металлофизика сверхпроводников» / под ред. Е.М. Савицкого, В.В. Барон. – М: Наука; 1965. [Savitsky EM, Baron VV, editors. Proceedings of the I Meeting on Metallurgy and Metal Physics of Superconductors “Metallovedenie i metallofizika sverhprovodnikov”. Moscow: Nauka; 1965. (In Russ.)].
2. Savitsky EM, Baron VV, editors. Metal Science, Physical Chemistry and Metal Physics of Superconductors. Proceedings of the Second and Third Conferences. May 1965 and May 1966; Moscow, USSR. NY: Springer; 1967. doi: 10.1007/978-1-4684-8220-1
3. Труды IV Всесоюзного совещания по физико-химии, металлосведению и металлофизике сверхпроводников «Физико-химия, металлосведение и металлофизика сверхпроводников» / под ред. Е.М. Савицкого, В.В. Барон. – М: Наука; 1969. [Savitsky EM, Baron VV, editors. Proceedings of the Fourth All-Union Conference “Fiziko-himiya, metallovedenie i metallofizika sverhprovodnikov”. Moscow: Nauka; 1969. (In Russ.)].
4. Труды V Всесоюзного совещания по физико-химии, металлосведению и металлофизике сверхпроводников «Проблемы сверхпроводящих материалов» / под ред. Е.М. Савицкого, В.В. Барон. – М: Наука; 1970. [Savitsky EM, Baron VV, editors. Proceedings of the V All-Union Conference on Physical Chemistry, Metallurgy and Metal Physics of Superconductors “Problemy sverhprovodyashchih materialov”. Moscow: Nauka; 1970. (In Russ.)].

5. Труды VI Всесоюзного совещания по проблеме сверхпроводящих материалов «Сверхпроводящие сплавы и соединения» / под ред. Е.М. Савицкого, В.В. Барон, Л.Ф. Мызенковой. – М: Наука; 1972. [Savitsky EM, Baron VV, Myzenkova LF, editors. Proceedings of the Sixth All-Union Conference on the Problem of Superconducting Materials “Sverhprovodyashchie splavy i soedineniya”. Moscow: Nauka; 1972. (In Russ.)].
6. Структура и свойства сверхпроводящих материалов / под ред. Е.М. Савицкого, В.В. Барон, Л.Ф. Мызенковой. – М: Наука; 1974. [Savitsky EM, Baron VV, Myzenkova LF, editors. *Struktura i svojstva sverhprovodyashchih materialov*. Moscow: Nauka; 1974. (In Russ.)].
7. Физико-химия сверхпроводников / под ред. Е.М. Савицкого. – М: Наука; 1976. [Savitsky EM, editor. *Fiziko-himiya sverhprovodnikov*. Moscow: Nauka; 1976. (In Russ.)].
8. Карпов М.И., Коржов В.П., Внуков В.И., Зверев В.Н. Получение, механические и сверхпроводящие свойства наноструктурных многослойных композитов Nb/Nb–Ti // Известия высших учебных заведений. Серия: физика. – 2010. – № 3/2. – С. 144–150. [Karpov MI, Korzhov VP, Vnukov VI, Zverev VN. Poluchenie, mekhanicheskie i sverhprovodyashchie svojstva nanostrukturnyh mnogoslajnyh kompozitov Nb/Nb–Ti. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: fizika* 2010;(3/2):144-150. (In Russ.)].
9. Korzhov VP, Karpov MI, Zverev VN. Superconductivity and structure of multilayer Cu/Nb/Nb–Ti nanocomposites. *Russian Journal of General Chemistry*. 2010;80(6):1103-1108. doi: 10.1134/s1070363210060113
10. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. – М: Наука; 1982. [Shmidt VV. *Vvedenie v fiziku sverhprovodnikov*. Moscow: Nauka; 1982. (In Russ.)].
11. Карпов М.И., Коржов В.П., Внуков В.И. и др. Сверхпроводящий критический ток в наноламинате Cu–Nb // *Материаловедение*. – 2005. – № 2. – С. 43–47. [Karpov MI, Korzhov VP, Vnukov VI, et al. Superconducting critical current in Cu–Nb nanolaminate. *Materials Science*. 2005;(2):43-47. (In Russ.)].
12. Засуха П.Ф., Коршиков В.Д., Бухвалов О.Б., Ершов А.А. Биметаллический прокат. – М: Металлургия; 1971. [Zasucha PF, Korshchikov VD, Bukhvalov OB, Ershov AA. *Bimetallicheskiy prokat*. Moscow: Metallurgia; 1971. (in Russ.)].
13. Karpov MI, Korzhov VP, Prokhorov DV, et al. Preparation, structure and high temperature properties of layered Nb/Al- and Ti/Al-composites. *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies*. 2014;8:177-185. [cited 2019 July 6]. Available from: <https://www.scientific-publications.net/get/1000002/1401699459713256.pdf>
14. Баранов И.А., Бычков Ю.Ф., Коржов В.П., и др. Влияние родия на сверхпроводящие свойства циркония и некоторых его сплавов // Труды VI Всесоюзного совещания по проблеме сверхпроводящих материалов «Сверхпроводящие сплавы и соединения». – М: Наука; 1972. – С. 140–147. [Baranov IA, Bychkov Yu.F., Korzhov VP, et al. Influence of rhodium on the superconducting properties of zirconium and some of its alloys. Proceedings of the Sixth All-Union Conference on the Problem of Superconducting Materials “Superconducting alloys and compounds”. Moscow: Nauka; 1972. pp. 140-147. (In Russ.)].

**Сведения об авторах:**

**Коржов Валерий Поликарпович**, кандидат технических наук;  
адрес: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, Институтский проспект, д. 9, кв. 99;  
eLibrary SPIN: 2408-9676; Scopus ID: 7004317671;  
E-mail: korzhov@issp.ac.ru

**Зверев Владимир Николаевич**, доктор физико-математических наук;  
eLibrary SPIN: 8391-3919; Scopus ID: 7101973582;  
E-mail: zverev@issp.ac.ru

**Information about the authors:**

**Valery P. Korzhov**, candidate of technical sciences;  
address: 142432, Moscow Region, Chernogolovka, Institutsky Prospect, 9, Apt. 99;  
eLibrary SPIN: 2408-9676; Scopus ID: 7004317671;  
E-mail: korzhov@issp.ac.ru

**Vladimir N. Zverev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
eLibrary SPIN: 8391-3919; Scopus ID: 7101973582;  
E-mail: zverev@issp.ac.ru

**Цитировать:**

Коржов В.П., Зверев В.Н. Многослойная сверхпроводящая лента сплава Nb50Ti, полученная из композита Cu/Nb/Ti твердофазным способом // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 31–46. doi: 10.17816/transsyst20195231-46

**To cite this article:**

Korzhov VP, Zverev VN. A multilayer superconducting tape of the Nb50Ti alloy obtained from a Cu/Nb/Ti composite with a solid phase. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):31-46. doi: 10.17816/transsyst20195231-46

## Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление «Электротехника»

УДК [UDC] 656.34

DOI 10.17816/transsyst20195247-59

© О. Н. Ларин<sup>1</sup>, А.В. Боков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский университет транспорта

<sup>2</sup> Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова  
(Москва, Россия)

### О СПОСОБЕ СНИЖЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ВОЗДУХА ДВИЖЕНИЮ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ВНУТРИ ТРАНСПОРТОПРОВОДА

**Обоснование:** Движение поезда в изолированном пространстве с естественным атмосферным давлением воздушной среды сопровождается потерями энергии на непроизводительную работу по преодолению профильных сопротивлений со стороны фронтальной и тыльной поверхностей подвижного состава. При этом также отмечается значительное увеличение затрат энергии на преодоление растущей силы встречного сопротивления воздуха. Для исключения указанных потерь энергии предлагается организовать синхронное и сбалансированное по объёмам откачивание воздуха из передней части транспортпровода и нагнетание воздуха в заднюю часть транспортпровода.

**Цель:** Разработать способ организации воздухообмена внутри транспортпровода, который обеспечит снижение профильных сопротивлений воздуха движению поезда.

**Методы:** Предложенные разработки основаны на общеизвестных отечественных и зарубежных конструкциях высокоскоростных транспортных систем трубного типа, использовались результаты сравнительного анализа транспортпроводов с различной степенью откачки воздуха (глубоким вакуумом и форвакуумом), учитывался опыт перераспределения остаточного объёма воздуха в транспортпроводе в системах “Hyperloop” и “TransPod”. Параметры работы компрессорных установок, перекачивающих воздух во внутренней полости транспортпровода при движении транспортного средства, регулируются на основе моделей процесса газодинамики.

**Результаты:** Разработаны новый способ и устройство снижения силы сопротивления воздуха движению поезда путём принудительного воздухообмена, который предусматривает перераспределение воздуха из передней части в заднюю часть транспортпровода относительно направления движения транспортного средства. Для перераспределения воздуха используется устройство внешнего воздухообмена, состоящее из воздухопроводов, компрессорных установок, задвижек, воздухонакопителя. Процесс внешнего воздухообмена производится только во время движения поезда, для движения транспортного средства предварительная откачка воздуха не требуется. Процесс перераспределения воздуха регулируется с учётом скорости движения транспортного средства, его местоположения в транспортпроводе, конструктивных особенностей тоннеля и подвижного состава. Скорость движения транспортного

средства по каждому отрезку скоростного участка нормируется в зависимости от фактической производительности компонентов воздухообменной системы. Режимы работы компрессорных установок должны обеспечивать синхронное перераспределение воздуха из передней части в заднюю часть транспортпровода. Движение поезда по транспортпроводу с нормальным атмосферным давлением во внутренней полости обеспечивает условия для безопасной транспортировки грузов и пассажиров.

**Заключение:** Разработанный способ предназначен для снижения силы сопротивления воздуха при движении транспортного средства внутри герметичного транспортпровода без создания вакуума. Представленные разработки имеют перспективы использования в проектах высокоскоростных транспортных систем подземного и подводного исполнения.

**Ключевые слова:** высокоскоростные транспортные системы, вакуумный трубный транспорт, профильное сопротивление воздуха, воздухообмен, Гиперлуп.

## Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field “Electrical Engineering”

© Oleg N. Larin<sup>1</sup>, Alexander V. Bokov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Russian University of Transport (МИИТ)

<sup>2</sup>Plekhanov Russian University of Economics  
(Moscow, Russia)

### DECREASING OF PROFILE AIR DRAG TO THE TRAIN MOVEMENT INSIDE THE TUBE TRANSPORT

**Background:** The movement of the train in an insulated space with the natural atmospheric pressure is accompanied by energy losses for unproductive work to overcome the profile air drag from the front and rear surfaces of the vehicle. At the same time, there is also a considerable increase of energy costs for overcoming the growing force of oncoming air drag. In order to exclude these energy losses, it is proposed to organize synchronous and volume-balanced pumping of air from the front part of the tube transport and injection of the air into the back part of the tube transport.

**Aim:** To develop a method of organising air exchange inside the tube transport, which will ensure the reduction of air resistance to the movement of the train.

**Methods:** The proposed developments are based on well-known national and foreign designs of high-speed tube transport systems, the results of a comparative analysis of tube transport with varying degrees of air pumping (backing vacuum and hard vacuum), taking into account the experience of redistributing the residual air volume in the “Hyperloop” and “TransPod” tube transport systems. The operating parameters of the compressor units that pump air into the internal cavity of the tube when the train is in motion is regulated on the basis of process models of gas dynamics.

**Results:** A new method and device has been developed for reducing the air drag to the movement of the train by forced air exchange, which provides for the redistribution of air from the front to the rear of the transport tube relative to the vehicle travel direction. For the air redistribution, the external air exchange unit, consisting of air ducts, compressor units,

gate valves, and air collectors is used. The process of external air exchange takes place only when the vehicle is in motion, for the movement of the vehicle no prior air exhaust is required. The air redistribution is controlled taking into account the speed of the train, its location in the tube, the design features of the tunnel and vehicle. The speed of the train for each segment of the speed section is normalised depending on the actual performance of the components of the air exchange system. Modes of operation of the compressor units must ensure synchronous redistribution of air from the front to the rear of the tube. The movement of a vehicle along a tube with normal atmospheric pressure in the internal cavity provides conditions for the safe transportation of goods and passengers.

**Conclusion:** The developed method is designed to reduce the force of air resistance when the train is in motion inside the airtight tube without creating vacuum. The presented developments have good prospects for use in projects of high-speed transport systems of both underground and underwater designs.

**Keywords:** high-speed transportation systems, evacuated tube transport, profile air drag, air exchange, Hyperloop.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день известны различные концептуальные варианты высокоскоростных транспортных систем тоннельного и трубного типа, которые проектируются для перевозки грузов и пассажиров со скоростью более одной тысячи километров в час. Наибольшей популярностью в среде разработчиков пользуются вакуумные транспортные системы с герметичными транспортными трубами, из которых воздух, создающий сопротивление движению транспортного средства в изолированном пространстве, откачивается при помощи компрессорных установок (Evacuated tube transport). Для безопасной перевозки грузов и пассажиров по вакуумным транспортным системам необходимо использовать специализированный подвижной состав с прочным герметичным корпусом, способным сохранять атмосферное давление внутри салона при значительно ниже атмосферного давления снаружи корпуса (то есть в транспортном трубе). К основным конкурентным преимуществам вакуумных транспортных систем, по сравнению с другими видами транспорта, относятся: высокая скорость движения транспортного средства при низких эксплуатационных расходах (так как в безвоздушном пространстве подвижной состав не тратит энергию на преодоление силы сопротивления встречного воздушного потока); независимость работы от метеорологических условий (ветра, тумана, осадков); исключение столкновений движущихся транспортных средств.

Преимущественной сферой применения вакуумных транспортных систем являются перевозки грузов и пассажиров на магистральных сообщениях между крупными мегаполисами. На таких маршрутах вакуумные транспортные системы способны конкурировать даже с воздушным транспортом, так как самолет тратит время и энергию для

подъема на высоту с низкой плотностью воздушной среды, в которой осуществляет скоростное перемещение. В свою очередь транспортное средство при движении в вакуумном транспортномпроводе переходит в аналогичный режим работы (с низкой плотностью встречного воздушного потока) без дополнительных потерь времени и энергии. Наибольший эффект от эксплуатации вакуумных транспортных систем может быть получен при их интеграции с городскими транзитными системами, в частности, метрополитеном, пригородными поездами [1-4]. Однако вакуумные транспортные системы имеют ряд недостатков: требуются значительные капитальные расходы на их сооружение; необходимо обеспечивать безопасность перевозок в условиях низкого давления; расходы на обслуживание трубопровода могут превысить эффект от увеличения скорости сообщений [5].

## МЕТОДЫ

Основным конструктивным элементом высокоскоростных транспортных систем тоннельного и трубного типа является изолированный от внешней окружающей среды транспортныйпровод, который состоит из корпуса, как правило, округлой формы, и транспортнопроводящего пути, используемого для движения транспортного средства. Первые прототипы высокоскоростных трубных систем, основанные на вакуумном способе снижения силы сопротивления воздуха движению транспортного средства в герметичном транспортномпроводе, появились более ста лет назад. Например, российский ученый Борис Петрович Вейнберг и американский инженер Роберт Годдард (Robert H. Goddard) независимо друг от друга предложили организовать движение транспортного средства на высокой скорости внутри трубы, из которой должен быть откачен воздух [6-7].

В течение двадцатого века концептуальные подходы к проектированию вакуумных транспортных систем активно развивались. Предлагались различные модификации конструкций транспортнопровода, адаптировались инновационные силовые установки для привода транспортного средства. Например, американский изобретатель Дэрил Остер (Daryl Oster) запатентовал совмещенную конструкцию из нескольких вакуумных трубопроводов, по которым должно осуществляться движение транспортных средств по встречным направлениям [8-9].

Современные модели трубных транспортных систем, которые предусматривают использование вакуумного способа снижения силы воздушного сопротивления движению транспортного средства, разделяются на два основных конструктивных типа в зависимости от степени снижения давления воздушной среды во внутренней полости

транспортопровода. Во-первых, системы с глубоким вакуумом (*hard vacuum*), внутри которых давление снижается менее 1 Па. Во-вторых, системы с форвакуумом (*vorvakuum*), в которых давление снижается ниже 100 Па. По мнению многих экспертов, наиболее перспективными являются форвакуумные транспортные системы, так как затраты на их создание и эксплуатацию значительно меньше по сравнению с необходимыми капитальными вложениями в глубоковакуумные транспортные системы, а различия между данными транспортными системами по технико-эксплуатационным показателям работы незначительны. При этом наибольшим потенциалом обладают форвакуумные транспортные системы, использующие для движения транспортного средства магнитолевитационную технологию. Такие конструкции по экологическим и экономическим показателям способны превзойти все существующие альтернативные системы транспортировки [10].

Однако скоростные возможности и экономическая эффективность форвакуумных систем ограничиваются фундаментальными факторами, которые известны в теории газовой динамики как “предел Кантrowица” (*Kantrowitz limit*) [11-13]. Данные факторы проявляются при движении транспортного средства со сверхзвуковой скоростью в изолированной среде и характеризуются тем, что воздух перестает просачиваться из передней части внутренней полости транспортопровода (расположена перед головной частью движущегося подвижного состава) в заднюю часть, расположенную за хвостовой частью движущегося подвижного состава, через межстеночное пространство, которое формируется корпусом транспортопровода и транспортного средства. Оставшийся (не просочившийся) воздух создает избыточное давление перед транспортным средством и усиливает сопротивление его движению по транспортопроводу.

Для обеспечения свободного перетока воздуха через межстеночное пространство в форвакуумных системах применяются особые формы конструкций подвижного состава и увеличивается диаметр транспортопровода до такого размера, при котором весь объем остаточного воздуха, независимо от скорости движения транспортного средства, будет беспрепятственно проходить из передней части в заднюю часть транспортопровода и заполнять разряженное пространство за транспортным средством. Однако данные способы также не лишены недостатков. В частности, создание и эксплуатация вакуумных транспортных систем с большим диаметром транспортопровода приводит к росту затрат и негативно отражается на окупаемости инвестиций в подобные проекты.

Поэтому для форвакуумных транспортных систем также является актуальной задача снижения силы сопротивления встречного воздушного потока движению транспортного средства посредством принудительного

перераспределения воздуха из передней части в заднюю часть транспортпровода. В контексте настоящего исследования совокупность действий, которые или в результате которых обеспечивается перераспределение воздуха из передней части в заднюю часть транспортпровода будем называть процессом воздухообмена.

В форвакуумных транспортных системах “Hyperloop” и “TransPod” процесс воздухообмена предлагается осуществлять в границах внутренней полости транспортпровода при помощи устройств, входящих в конструкцию транспортного средства. Данный способ будем называть “внутренним воздухообменом”. Основным конструктивным элементом, применяемым для “внутреннего воздухообмена” в вакуумных транспортных системах, является компрессорная установка, которая располагается в головной части подвижного состава. В “Hyperloop” компрессорная установка перераспределяет встречный поток воздуха под днище транспортного средства для создания воздушной подушки, облегчающей движение подвижного состава [13]. В “TransPod” компрессорная установка перекачивает воздух по каналам в корпусе подвижного состава и выбрасывает его (воздух) через выпускное сопло в заднюю часть транспортпровода. При этом на выходе из сопла создается реактивная тяга, которая используется для дополнительного ускорения транспортного средства [14].

Однако организация “внутреннего воздухообмена” по вариантам “Hyperloop” and “TransPod” снижает провозные возможности и эффективность работы подобных транспортных систем, так как размещение на подвижном составе дополнительного оборудования (компрессорных установок, воздухопроводов и пр.) приводит к сокращению вместимости и грузоподъемности подвижного состава. Более того, конструкции “Hyperloop” and “TransPod” имеют еще ряд недостатков, которые характерны для всех моделей вакуумных транспортных систем форвакуумного и глубоковакуумного типа. В частности, снижение силы сопротивления воздуха движению транспортного средства за счет создания вакуума в транспортпроводе сопряжено с риском повреждения пассажиров или грузов в случае разгерметизации корпуса транспортного средства. Кроме того, на создание вакуумных транспортных систем потребуется значительный объем инвестиций, так как конструкции транспортпроводов и подвижного состава, предназначенных для работы в условиях с большими перепадами давлений, должны обладать повышенной прочностью, а эксплуатация данных систем будет сопровождаться дополнительными эксплуатационными расходами на устранение возможных протечек воздуха через стенки трубного корпуса. На время поиска протечек и ремонта корпуса движение поездов потребуется останавливать. Поэтому представляется более перспективным использование высокоскоростных “безвакуумные” трубных транспортных

систем с нормальным атмосферным давлением, в которых для снижения профильного сопротивления движению транспортного средства предлагается организовать процесс “внешнего воздухообмена” между передней и задней частями внутренней полости транспортнопроводящей конструкции.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Основная цель внедрения предлагаемого “безвакуумного” способа снижения силы сопротивления воздуха движению транспортного средства состоит в повышении эффективности и безопасности процесса транспортировки грузов и пассажиров по герметичным транспортнопроводам за счёт организации “внешнего воздухообмена” между передними и задними частями транспортнопроводов.

Движение транспортного средства в изолированном пространстве с естественным атмосферным давлением воздушной среды сопровождается потерями энергии на непроизводительную работу по преодолению профильных сопротивлений со стороны фронтальной и тыльной поверхностей подвижного состава, обусловленных нежелательным изменением давления в транспортнопроводе – в передней части транспортнопровода происходит нагнетание давления и уплотнение воздуха, в задней части отмечается уменьшение давления и плотности воздушной среды. Характерные изменения параметров воздуха в связи с движением транспортного средства называются поршневым эффектом [15]. При поршневых эффектах отмечается значительное увеличение затрат энергии на преодоление растущей силы встречного сопротивления воздуха, величина которой пропорциональна квадрату скорости движения транспортного средства [16]. Для исключения указанных энергетических потерь предлагается организовать синхронное и сбалансированное по объемам откачивание воздуха из передней части транспортнопровода и нагнетание воздуха в заднюю часть транспортнопровода. Общий принцип осуществления процесса внешнего воздухообмена и конструктивные элементы устройства, применяемые для осуществления данного процесса, показаны на Рис.

Перераспределение воздушного потока между передней (1) и задней (2) частями транспортнопровода осуществляется путем организации внешнего воздухообмена через обособленный по отношению к транспортнопроводу воздухонакопитель (3), представляющий собой типичный резервуар для хранения газов, как правило, цилиндрической формы, сварной конструкции с повышенными требованиями к материалам, применяемым для их изготовления.

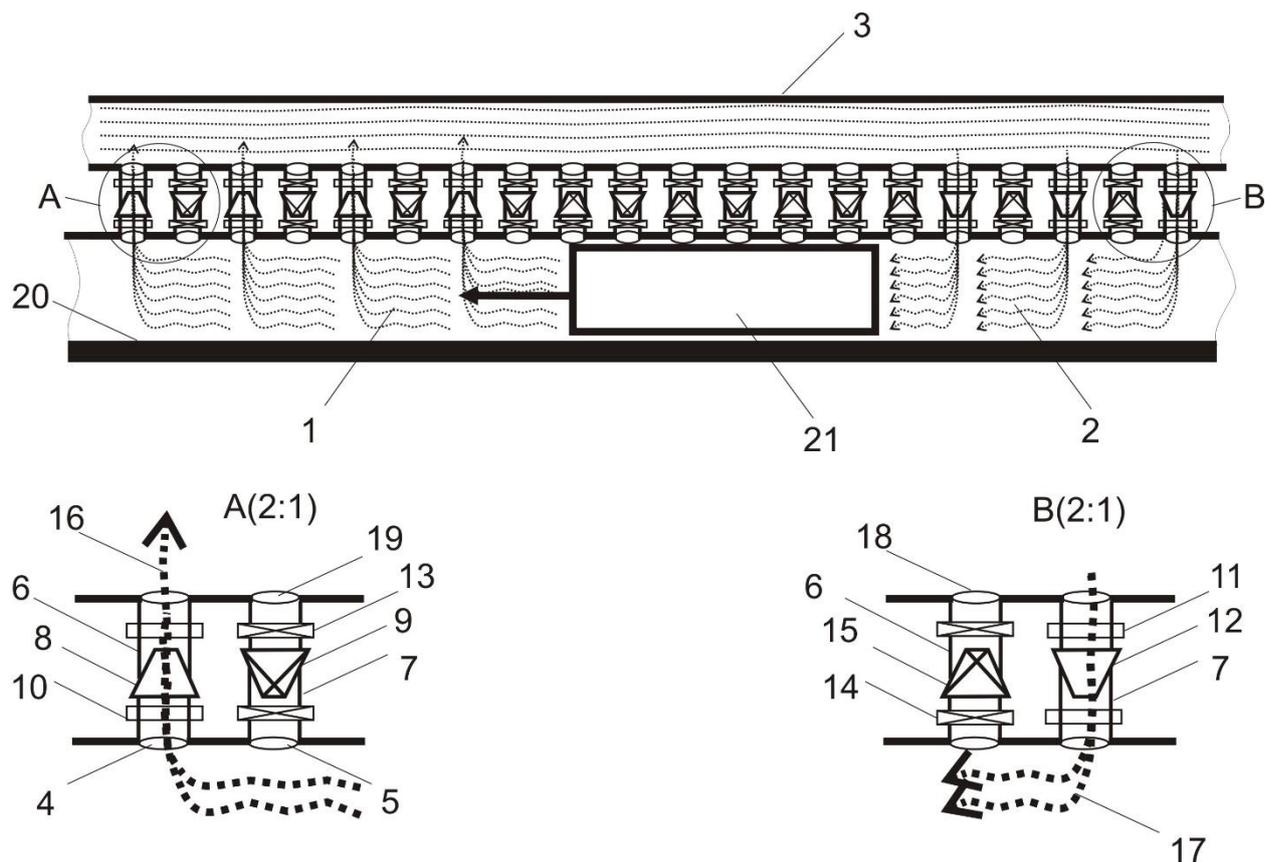


Рис. Общая структура и принцип действия устройства внешнего воздухообмена с обособленными воздуховодами:

- 1 – передняя часть трубопровода (область повышенного давления воздуха);
- 2 – задняя часть трубопровода (область пониженного давления воздуха);
- 3 – воздухонакопитель; 4 – сквозное отверстие в корпусе трубопровода для откачки воздуха; 5 – сквозное отверстие в корпусе трубопровода для нагнетания воздуха; 6 – обособленный отводящий воздуховод; 7 – обособленный нагнетающий воздуховод; 8 - отводящие компрессорные установки включены; 9 – нагнетающие компрессорные установки выключены; 10 - задвижка отводящего воздуховода в открытом положении; 11 – задвижка нагнетающего воздуховода в открытом положении; 12 – нагнетающие компрессорные установки включены; 13 – задвижка нагнетающего воздуховода в закрытом положении; 14 – задвижка отводящего воздуховода в закрытом положении; 15 – отводящие компрессорные установки выключены; 16 – направление движение воздуха из трубопровода в воздухонакопитель; 17 – направление движение воздуха из воздухонакопителя в трубопровод; 18 – сквозное отверстие в корпусе воздухонакопителя для откачивания воздуха; 19 – сквозное отверстие в корпусе воздухонакопителя для нагнетания воздуха; 20 – корпус трубопровода; 21 – транспортное средство.

Для организации внешнего воздухообмена в корпусе трубопровода делается, по меньшей мере, одно сквозное отверстие (4) для откачки воздуха, и, по меньшей мере, одно сквозное отверстие (5) для нагнетания воздуха. Отверстия изготавливаются, как правило,

округлой формы в поперечном сечении и равномерно распределяются по корпусу транспортпровода. Рекомендуется отверстия разных типов (для откачки и нагнетания воздуха) располагать попарно в непосредственной близости друг от друга, насколько допускают габариты конструкции транспортпровода.

Устройство внешнего воздухообмена состоит из обособленных отводящих (6) и нагнетающих (7) воздухопроводов, по которым соответственно осуществляется откачка воздуха из транспортпровода и подача воздуха в транспортпровод; воздухонакопителя (3), принимающего откачиваемый воздух из передней части транспортпровода, и откуда отбирается воздух для нагнетания в заднюю часть транспортпровода; компрессорных установок (8) и (9), выполняющих работу по перекачке воздуха; задвижек, которые используются для предотвращения перетока воздуха между транспортпроводом и воздухонакопителем при отключенных компрессорных установках. На Рис. 1 задвижки (10) и (11) показаны в открытом положении, когда отводящий (8) и нагнетающий (12) компрессоры включены, а задвижки (13) и (14) показаны в закрытом положении, когда компрессоры нагнетающий (9) и отводящий (15) компрессоры отключены. При данном рабочем состоянии элементов воздухообменного устройства воздух из передней части транспортпровода (1) перемещается в воздухонакопитель (16) и из воздухонакопителя перемещается (17) в заднюю часть транспортпровода (2). Возможна организация процесса воздухообмена без использования устройства воздухонакопителя напрямую через атмосферу. Такая конструкция может применяться для снижения затрат на сооружение высокоскоростной транспортной системы наземного исполнения.

Совокупность отводящих воздухопроводов с задвижками и компрессорными установками образуют отводящую систему. Аналогично совокупность нагнетающих воздухопроводов с задвижками и компрессорными установками образуют нагнетающую систему. Конструктивно и функционально соединенные в единое устройство отводящие воздухопроводы, задвижки и компрессорные установки, равно как и соединенные нагнетающие воздухопроводы, задвижки и компрессорные установки, образуют обособленные узлы соответствующих воздухоотводящей или воздухонагнетающей систем (далее – компоненты воздухообменной системы).

Отводящие (8) и нагнетающие (9) воздухопроводы герметично прикрепляются (свинчиванием, сваркой или другими надежными способами) к транспортпроводу и воздухонакопителю по периметру соответствующих сквозных отверстий (4) и (5). Аналогичным образом воздухопроводы прикрепляются к воздухонакопителю (3) по периметру сквозных отверстий (18) и (19) в его корпусе. Герметичное соединение

транспортопровода и воздухонакопителя позволяет создавать высокоскоростные транспортные системы подземного и подводного исполнения.

При необходимости интенсивность воздухообмена может быть повышена за счет добавления дополнительных откачивающих и нагнетающих воздухопроводов. При этом возможно уплотнение воздухопроводов (6) и (7) путем их присоединения к транспортопроводу или воздухонакопителю через совмещенные сквозные отверстия (4) и (5), либо (18) и (19) соответственно. Такое конструктивное решение также позволяет уменьшить габаритные размеры воздухонакопителя.

Организация внешнего воздухообмена предусматривает регулирование работы задвижек и компрессорных установок в автоматическом режиме на основе данных о фактическом местонахождении транспортного средства во внутренней полости транспортопровода и скорости его движения. Для сбора соответствующей информации могут применяться электронные датчики, встроенные в транспортопроводящий путь, корпус транспортопровода и подвижной состав [14, 17-20]. Скорость движения транспортного средства по каждому отрезку скоростного участка нормируется в зависимости от фактической производительности компонентов воздухообменной системы. При этом вопросы регулирования работы компонентов воздухообменной системы являются самостоятельной темой исследования и не рассматриваются в рамках настоящей статьи.

## ВЫВОДЫ

Разработанный способ предназначен для снижения силы сопротивления воздуха при движении транспортного средства внутри герметичного транспортопровода без создания вакуума. При этом представленные в статье результаты исследования и предложенные разработки не имеют цели поставить под сомнение перспективность разработки и эффективность использования вакуумных транспортных систем. Авторы стремятся привлечь внимание специалистов к необходимости дальнейшего развития систем и конструкций, которые способны обеспечить снижение профильных сопротивлений воздуха движению транспортных средств с высокой скоростью по транспортопроводам тоннельного и трубного типа. По мнению авторов, подобные транспортные системы имеют перспективы для широкого применения. В последнее время обсуждаются различные проекты сооружения подобных конструкций подземного и подводного исполнения. Например, Национальное консультативное бюро из Объединенных Арабских Эмиратов объявило о планах строительства подводного туннеля между Фуджейрой (ОАЭ) и Мумбаи (Индия), который будет находиться на

углублении от поверхности Индийского океана. По герметичному тоннелю планируется организовать скоростное движение железнодорожных поездов, а также провести трубопроводы с нефтью, газом и водой. Дополнительно обсуждается вопрос прокладки в тоннеле изолированного форвакуумного железнодорожного транспортпровода. При этом параметры подводного тоннеля позволяют разместить в нём предлагаемую авторами статьи систему внешнего воздухообмена, которая позволит упростить конструкцию тоннеля и повысить скорость движения поездов. Разработанный авторами способ также может быть использован при организации железнодорожного сообщения по тоннелю между Хельсинки и Таллинном, который планируется построить в ближайшие годы по дну Балтийского моря.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность организаторам и участникам 7-й Международной научно-практической конференции «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» (МТСТ'19), в рамках которой прошло обсуждение представленной выше разработки и были высказаны весьма ценные замечания и предложения, что позволило авторам улучшить структуру статьи и сделанные в ней выводы.

### Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Zhang Y, Li Y. Role and Position of ETT in the Future Comprehensive Transportation System. In: International Conference of Transportation Engineering, Chengdu, China. *The American Society of Civil Engineers (ASCE)*. 2007;(7):2796-2803. doi: 10.1061/40932(246)459.
2. Oster D, Kumada M, Zhang YJ. Evacuated tube transport technologies (ET3)tm: a maximum value global transportation network for passengers and cargo. *Journal of Modern Transportation*. 2011;(19):42-50. doi: 10.1007/BF03325739.
3. Ларин О.Н., Козицкий Ю.Г. Принципы создания скоростных систем городского пассажирского транспорта // *Инновационный транспорт*. – 2014. – № 4(14). – С. 14–17. [Larin ON, Kozitsky YG. Principles of high-speed urban transport systems creation. *Innotrans*. 2014;4(14):14-17. (In Russ.)].
4. Chevtchenko OA, Bakker R, Oster D, et al. Closing the infrastructure gap through innovative and sustainable solutions. Strategy innovation paper. PBD Industries, Inc. ET3 GA. [Internet]. [cited 2018 March 7]. Available from: [http://et3.eu/images/upload/Strategy%20innovation%20paper%20ET3\(1\).pdf](http://et3.eu/images/upload/Strategy%20innovation%20paper%20ET3(1).pdf).

5. Zhang YP, Li SS, Wang MX. Main Vacuum Technical Issues of Evacuated Tube Transportation. *Physics Procedia*. Elsevier BV; 2012;32:743-747. doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.628
6. Robert DA. Robert H. Godard's "High-Speed Bet". *Executive Intelligence Review*. 1991;18(42):34-35.
7. Вейнберг Б.П. Движение без трения (безвоздушный электрический путь). – СПб: Книгоиздательство «Естествоиспытатель», 1914. [Weinberg BP. Dvizhenie bez treniya (bezvozdushnyj elektricheskij put'). St. Petersburg: Knigoizdatel'stvo "Estestvoispyatel"; 1914. (In Russ)]. Доступно по: [http://veinberg.o7.ru/pdf/no\\_friction\\_motion.pdf](http://veinberg.o7.ru/pdf/no_friction_motion.pdf). Ссылка активна на: 23.05.2019.
8. Pat. US 2014/0261054A1/ 18.09.2014. Oster D. Evacuated tube transport system with interchange capability. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3c/8c/fe/b634c1cb6fed33/US20140261054A1.pdf>. Accessed May 23, 2019.
9. Pat. 2014/0261055 A1/ 18.09.2014. Oster D. Evacuated tube transport system with improved cooling for superconductive elements. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/13/86/e6/4700df8c842239/US20140261055A1.pdf>. Accessed May 23, 2019.
10. Salter RM. The Very High Speed Transit System. RAND Corporation. 1972 Aug. Available from: <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/papers/2008/P4874.pdf>. Accessed May 23, 2019.
11. Kantrowitz A, Donaldson P. C. Preliminary investigation of supersonic diffusers. Washington: Langley Field, VA; 1945 May. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3c/8c/fe/b634c1cb6fed33/US20140261054A1.pdf>. Accessed May 23, 2019.
12. Sudip D, Jai P. Starting Characteristics of Rectangular Supersonic Air-Intake with Cowl Deflection. *The Aeronautical Journal*. March 2010;114(1153):177-189.
13. Hyperloop Alpha. SpaceX. 2013 Aug. Available from: [https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha-20130812.pdf](https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf). Accessed May 23, 2019.
14. Janzen R. TransPod Ultra-High-Speed Tube Transportation: Dynamics of Vehicles and Infrastructure. In: X International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2017. *Procedia Engineering*. 2017;199:8-17. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.142
15. Красюк А.М., Лугин И.В., Павлов С.А. и др. Влияние поршневого действия поездов на тоннельную вентиляцию метрополитенов мелкого заложения // Метро и тоннели. – 2010. – № 2. – С. 30–32. [Krasnyuk AM, Lugin IV, Pavlov SA, et al. Vliyanie porshneвого dejstviya poezdov na tonnel'nyuyu ventilyaciyu metropolitenov melkogo zalozheniya. *Metro i tonneli*. 2010;(2):30-32. (In Russ.)].
16. Чурков Н.А., Битюцкий А.А., Кручек В.А. Влияние воздушной среды на поезд // Известия ПГУПС. – 2013. – Вып. 2. – С. 20–26. [Churkov NA, Bityutsky AA, Kruchek VA. Effect of air on the train. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2013;(2):20-26. (In Russ.)]. Доступно по: <http://izvestiapgps.org/assets/files/10.20295-1815-588X-2013-2/10.20295-1815-588X-2013-2-5-11.pdf>. Ссылка активна на: 23.05.2019.
17. Nikolaev R, Idiataullin R, Nikolaeva D. Software system in Hyperloop pod. Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems. Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference, KES-2018, Belgrade, Serbia. *Procedia Computer Science*. 2018;126:878-890. doi: 10.1016/j.procs.2018.08.022
18. ERTMS – Delivering Flexible and Reliable Rail Traffic. A major industrial project for

- Europe. European Commission, Energy and Transport DG. 2006 Mar. Available from: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0c77ec53-5fd5-4e8f-a743-1c5d1415ffe6/language-en>. Accessed May 23, 2019.
19. Розенберг Е.Н., Озеров А.В. Построение систем управления и обеспечения безопасности движения поездов на ВСМ // Железнодорожный транспорт. 2018. – № 3. – С. 34–42. [Rosenberg EN, Ozerov AV. Postroenie sistem upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov na VSM. *Zheleznodorozhnyj transport*. 2018(3):34-42. (In Russ.)].
  20. Куприяновский В.П., Аленков В.В., Климов А.А. и др. Цифровая железная дорога – ERTMS, BIM, GIS, PLM и цифровые двойники // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13. – № 3. – С. 129–166. [Kupriyanovskiy VP, Alenkov VV, Klimov AA, et al. Digital railway - ERTMS, BIM, GIS, PLM and digital twins. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2017;13(3):129-166. (In Russ.)]. doi: 10.25559/SITITO.2017.3.546
  21. Zhang Y, Li Y. Role and Position of ETT in the Future Comprehensive Transportation System. In: International Conference of Transportation Engineering, Chengdu, China. *The American Society of Civil Engineers(ASCE)*. 2007;(7):2796-2803. doi: 10.1061/40932(246)459.
  22. Oster D, Kumada M, Zhang YJ. Evacuated tube transport technologies (ET3)tm: a maximum value global transportation network for passengers and cargo. *Journal of Modern Transportation*. 2011;(19):42-50. doi: 10.1007/BF03325739.
  23. Ларин О.Н., Козицкий Ю.Г. Принципы создания скоростных систем городского пассажирского транспорта // Инновационный транспорт. – 2014. – № 4(14). – С. 14–17. [Larin ON, Kozitsky YG. Principles of high-speed urban transport systems creation. *Innotrans*. 2014;4(14):14-17. (In Russ.)].
  24. Chevtchenko OA, Bakker R, Oster D, et al. Closing the infrastructure gap through innovative and sustainable solutions. Strategy innovation paper. PBD Industries, Inc. ET3 GA. [Internet]. [cited 2018 March 7]. Available from: [http://et3.eu/images/upload/Strategy%20innovation%20paper%20ET3\(1\).pdf](http://et3.eu/images/upload/Strategy%20innovation%20paper%20ET3(1).pdf).
  25. Zhang YP, Li SS, Wang MX. Main Vacuum Technical Issues of Evacuated Tube Transportation. *Physics Procedia*. Elsevier BV; 2012;32:743-747. doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.628
  26. Robert DA. Robert H. Godard's 'High-Speed Bet'. *Executive Intelligence Review*. 1991;18(42):34-35.
  27. Вейнберг Б.П. Движение без трения (безвоздушный электрический путь). СПб.: Книгоиздательство "Естествоиспытатель", 1914. [Weinberg BP. Motion without friction (airless electric path). St. Petersburg: Publishing house "Naturalist"; 1914. (In Russ)]. Доступно по: [http://veinberg.o7.ru/pdf/no\\_friction\\_motion.pdf](http://veinberg.o7.ru/pdf/no_friction_motion.pdf). Ссылка активна на: 23.05.2019.
  28. Pat. US 2014/0261054A1/ 18.09.2014. Oster D. Evacuated tube transport system with interchange capability. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3c/8c/fe/b634c1cb6fed33/US20140261054A1.pdf>. Accessed May 23, 2019.
  29. Pat. 2014/0261055 A1/ 18.09.2014. Oster D. Evacuated tube transport system with improved cooling for superconductive elements. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/13/86/e6/4700df8c842239/US20140261055A1.pdf>. Accessed May 23, 2019.
  30. Salter RM. The Very High Speed Transit System. RAND Corporation. 1972 Aug. Available from: <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/papers/2008/P4874.pdf>.

- Accessed May 23, 2019.
31. Kantrowitz A, Donaldson P. C. Preliminary investigation of supersonic diffusers. Washington: Langley Field, VA; 1945 May. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3c/8c/fe/b634c1cb6fed33/US20140261054A1.pdf>. Accessed May 23, 2019.
  32. Sudip D, Jai P. Starting Characteristics of Rectangular Supersonic Air-Intake with Cowl Deflection. *The Aeronautical Journal*. March 2010;114(1153):177-189.
  33. Hyperloop Alpha. SpaceX. 2013 Aug. Available from: [https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha-20130812.pdf](https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf). Accessed May 23, 2019.
  34. Janzen R. TransPod Ultra-High-Speed Tube Transportation: Dynamics of Vehicles and Infrastructure. In: X International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2017. *Procedia Engineering*. 2017;199:8-17. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.142.
  35. Красюк А.М., Лугин И.В., Павлов С.А. и др. Влияние поршневого действия поездов на тоннельную вентиляцию метрополитенов мелкого заложения // Метро и тоннели. – 2010. – № 2. – С. 30–32. [Krasnyuk AM, Lugin IV, Pavlov SA, et al. Vliyanie porshneвого dejstviya poezdov na tonnel'nyuyu ventilyaciyu metropolitenov melkogo zalozheniya. *Metro i tonneli*. 2010;(2):30-32. (In Russ.)].
  36. Чурков Н.А., Битюцкий А.А., Кручек В.А. Влияние воздушной среды на поезд // Известия ПГУПС. – 2013. – Вып. 2. – С. 20–26. [Churkov NA, Bityutsky AA, Kruchek VA. Effect of air on the train. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2013;(2):20-26. (In Russ.)]. Доступно по: <http://izvestiapgups.org/assets/files/10.20295-1815-588X-2013-2/10.20295-1815-588X-2013-2-5-11.pdf>. Ссылка активна на: 23.05.2019.
  37. Nikolaev R, Idiatuallin R, Nikolaeva D. Software system in Hyperloop pod. Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems. Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference, KES-2018, Belgrade, Serbia. *Procedia Computer Science*. 2018;126:878-890. doi: 10.1016/j.procs.2018.08.022.
  38. ERTMS – Delivering Flexible and Reliable Rail Traffic. A major industrial project for Europe. European Commission, Energy and Transport DG. 2006 Mar. Available from: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0c77ec53-5fd5-4e8f-a743-1c5d1415ffe6/language-en>. Accessed May 23, 2019.
  39. Розенберг Е.Н., Озеров А.В. Построение систем управления и обеспечения безопасности движения поездов на ВСМ // Железнодорожный транспорт. 2018. – № 3. – С. 34–42. [Rosenberg EN, Ozerov AV. Postroenie sistem upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov na VSM. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2018(3):34-42. (In Russ.)].
  40. Куприяновский В.П., Аленков В.В., Климов А.А. и др. Цифровая железная дорога – ERTMS, BIM, GIS, PLM и цифровые двойники // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13. – № 3. – С. 129–166. [Kupriyanovskiy VP, Alenkov VV, Klimov AA, et al. Digital railway - ERTMS, BIM, GIS, PLM and digital twins. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2017;13(3):129-166. (In Russ.)]. doi: 10.25559/SITITO.2017.3.546

#### Сведения об авторах:

**Ларин Олег Николаевич**, доктор технических наук, профессор;  
адрес: 127994, Москва, ул. Образцова, д 9, стр. 9;  
eLibrary SPIN: 2283-4063; ORCID: 0000-0001-9020-2228;

E-mail: larin\_on@mail.ru

**Боков Александр Викторович**, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 6972-2337; ORCID: 0000-0001-9159-3566;  
E-mail: av\_bokov@mail.ru

**Information about the authors:**

**Oleg N. Larin**, Nikolaevich, Doctor of Engineering Sciences, Professor;  
address: 127994, Moscow, 9b9 Obrazcova Street;  
eLibrary SPIN: 2283-4063; ORCID: 0000-0001-9020-2228;  
E-mail: larin\_on@mail.ru

**Alexander V. Bokov**, Viktorovich, Candidate of Physical and Mathematica Sciences,  
Associate Professor;  
eLibrary SPIN: 6972-2337; ORCID: 0000-0001-9159-3566;  
E-mail: av\_bokov@mail.ru

**Цитировать:**

Ларин О.Н., Боков А.В. О способе снижения профильных сопротивлений воздуха движению транспортного средства внутри транспортнопровода // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 47–59. doi: 10.17816/transsyst20195247-59

**To cite this article:**

Larin ON, Bokov AV. Decreasing of Profile Air Drag to the Train Movement Inside the Tube Transport. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):47-59. doi: 10.17816/transsyst20195247-59

## Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление «Электротехника»

УДК [UDC] 621.313.6

DOI 10.17816/transsyst20195260-69

© В. А. Соломин, А. В. Соломин, А. А. Чехова, Л. Л. Замшина,  
Н. А. Трубицина

Ростовский государственный университет путей сообщения  
(Ростов-на-Дону, Россия)

### ЛИНЕЙНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ БЕЗ ПРОДОЛЬНОГО КРАЕВОГО ЭФФЕКТА

**Обоснование:** При высоких скоростях движения магнитнолевитационного транспорта (МЛТ) у линейных асинхронных двигателей (ЛАД) возникает вторичный продольный краевой эффект (ВПКЭ). ВПКЭ возникает при взаимодействии магнитного поля индуктора с токами вторичного элемента (ВЭ) за пределами экипажа МЛТ. ВПКЭ снижает коэффициент полезного действия тяговых ЛАД. Поэтому актуальна задача снижения влияния ВПКЭ.

**Цель:** Разработка и исследование линейного асинхронного двигателя без вторичного продольного краевого эффекта.

**Методы:** Для реализации поставленной цели предложены новые конструкции линейных асинхронных двигателей, у которых отсутствует ВПКЭ. Вторичный элемент ЛАД (путевая структура МЛТ) изготовлен из проводящих цилиндрических стержней, установленных с возможностью вращения. Тяговый ЛАД МЛТ снабжен двумя щетками, которые замыкают стержни ВЭ в пределах длины индуктора. При движении экипажа МЛТ стержни за пределами индуктора щетками не замкнуты, и тока в них нет. Не будет и ВПКЭ. Еще один метод решения данной задачи – использование герконов для замыкания и размыкания стержней вторичного элемента.

**Результаты:** Достигнута возможность увеличения коэффициента полезного действия ЛАД.

**Ключевые слова:** линейный асинхронный двигатель, вторичный продольный краевой эффект, магнитнолевитационный транспорт, стержни обмотки вторичного элемента, угольные щетки, герконы.

---

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта офи\_м\_РЖД, проект № 17-20-04236

## Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field “Electrical Engineering”

© Vladimir A. Solomin, Andrey V. Solomin, Anastasiya A. Chekhov,  
Larisa L. Zamchin, Nadezda A. Trubitsin

Rostov State Transport University  
(Rostov-on-Don, Russia)

### LINEAR INDUCTION MOTORS WITHOUT LONGITUDINAL EDGE EFFECT

**Background:** At high speeds of motion of the magnetic-levitation transport (MLT), linear induction motors (LIM) have a secondary longitudinal edge effect (SLEE). SLEE occurs when magnetic field of inductor interacts with the currents of the secondary element (SE) outside the MLT crew. SLEE reduces the efficiency of traction LIM. Therefore, the task of reducing the influence of SLEE is relevant.

**Aim:** Development and research of a linear induction motor without a secondary longitudinal edge effect.

**Methods:** To achieve this aim, new designs of linear induction motors have been proposed, which do not have a SLEE. The secondary element of the LIM (track structure of the MLT) is made of cylindrical conductive rods installed with the possibility of rotation. Traction LIM of the MLT equipped with two brushes that close the rods of the SE within the length of the inductor. When the MLT crew moves, the rods outside the inductor are not closed by brushes and there is no current in them. There will be no SLEE. Another method to solve this problem is using reed switches to close and open the rods of the secondary element.

**Results:** The possibility of increasing the efficiency of the LIM has been achieved.

**Keywords:** linear induction motor, secondary longitudinal edge effect, magnetic-levitation transport, rods of the secondary element winding, carbon brushes, reed switches.

### Введение

Магнитнолевитационный транспорт (МЛТ) позволит создать новые транспортные коридоры между восточными и западными частями России, снизить время нахождения в пути при пассажирских и грузовых перевозках за счет высоких скоростей движения. Магнитнолевитационный и вакуумный МЛТ (ВМЛТ) могут значительно изменить направления и интенсивность товарного грузооборота во всем мире, что будет способствовать техническому прогрессу и экономическому росту многих стран. Вопросам разработки и развития магнитнолевитационного транспорта придается большое внимание в промышленно развитых и даже развивающихся странах. В России над проблемами и задачами создания, исследования и применения МЛТ работают инженеры и ученые многих организаций, в числе которых Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС), на базе которого создан кластер «Российский Маглев», Российский университет транспорта (РУТ-МИИТ), Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),

научно-исследовательские институты и промышленные предприятия [1-7, 15]. Для тягового привода МЛТ и ВМЛТ предназначены линейные электрические двигатели. В статье рассматриваются линейные асинхронные двигатели (ЛАД), которые могут иметь пути для замыкания основного бегущего магнитного потока как в продольном, в поперечном, так и в продольно-поперечном направлениях. Эксплуатация высокоскоростного МЛТ потребует значительных материальных ресурсов и задачи их уменьшения являются актуальными. При использовании линейных асинхронных двигателей в качестве тяговых машин высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта возникает вторичный продольный краевой эффект (ВПКЭ), снижающий коэффициент полезного действия системы МЛТ.

### Цель

Создание новых конструкций линейных асинхронных двигателей, способных работать без вторичного продольного краевого эффекта и имеющих увеличенный коэффициент полезного действия – цель представленной разработки. Особенно резко проявляется ВПКЭ при высоких скоростях движения, поэтому необходимо совершенствовать конструкции тяговых ЛАД для магнитнолевитационного транспорта и вакуумного МЛТ.

### Конструкция линейного асинхронного двигателя

Вопросы исследования процессов, обусловленных конечными размерами линейных асинхронных двигателей в той или иной степени освещены в работах [8-19]. Публикаций, посвященных ЛАД без вторичного продольного краевого эффекта до сих пор не имеется. В основу разработки линейных асинхронных двигателей без ВПКЭ положена идея о полном отсутствии тока в электропроводящей части вторичного элемента (ВЭ) машины, расположенной вне пределов расположения индуктора. Рассмотрим первый вариант конструкции линейного асинхронного двигателя. Вторичный элемент (якорь) ЛАД. Встроенный в путевую структуру МЛТ, содержит короткозамкнутую обмотку, состоящую из круглых электропроводящих стержней, ориентированных перпендикулярно направлению движения транспортного экипажа МЛТ и установленных с возможностью вращения. Главная особенность данного линейного асинхронного двигателя в том, что короткозамкнутой обмотка становится только под индуктором ЛАД, который размещен на транспортном экипаже. Электропроводящие стержни под ЛАД замыкаются накоротко посредством двух угольных щеток, расположенных по обе стороны от сердечника индуктора и равных ему по длине.

Конструктивная схема такого тягового линейного асинхронного двигателя представлена на Рис. 1.

Линейный асинхронный двигатель содержит индуктор 1, состоящий из сердечника и трехфазной обмотки. Индуктор закреплен на планке 2 из неэлектропроводящего материала (Рис. 1, а). Вторичный элемент (путевая структура МЛТ) состоит из сердечника 3 цилиндрических электропроводящих стержней 4, размещенных в пазах сердечника с возможностью вращения вокруг своей оси (рис. 1, б). В пределах длины индуктора ЛАД стержни 4 замкнуты щетками 5 из электропроводящего материала. Щетки 5 установлены по обе стороны индуктора и жестко связаны с планкой 2. Концы электропроводящих стержней 4 расположены в подшипниках 6 (Рис. 1 б).

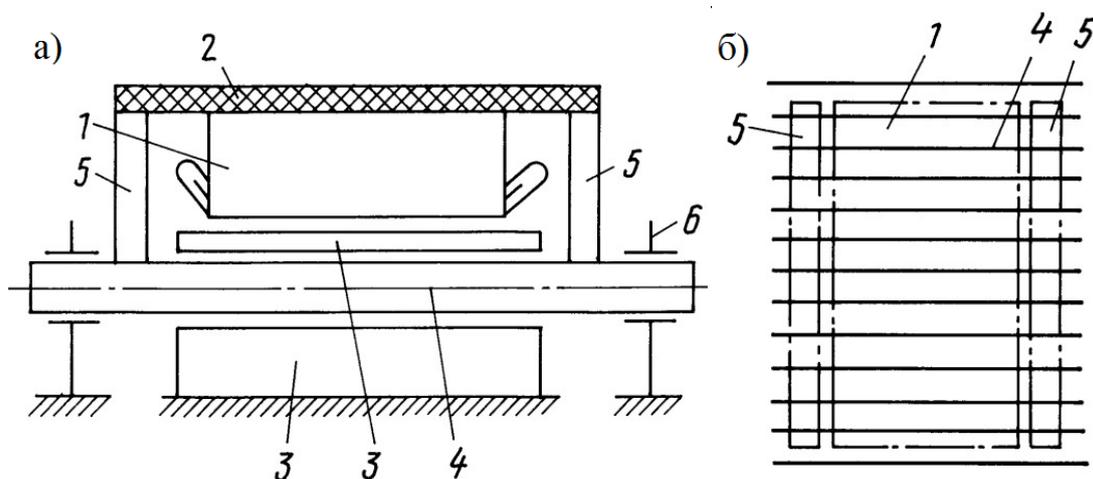


Рис.1. Линейный асинхронный двигатель с замыкающими щетками, а) и обмотка вторичного элемента, б).

- 1 – индуктор с трехфазной обмоткой; 2 – планка из изоляционного материала;  
3 – сердечник вторичного элемента; 4 – цилиндрические электропроводящие стержни обмотки вторичного элемента; 5 – щетки из электропроводящего материала;  
6 – подшипники

Принцип действия рассматриваемого линейного асинхронного двигателя заключается в следующем. При подаче трехфазного напряжения на обмотку индуктора возбуждается бегущее в продольном направлении магнитное поле. Бегущее магнитное поле пересекает стержни обмотки вторичного элемента, расположенные под индуктором (Рис. 1, б), и индуцирует в них электродвижущие силы. Стержни под индуктором замкнуты накоротко электропроводящими щетками и образуют короткозамкнутую обмотку, вследствие этого под действием электродвижущих сил в стержнях потекут токи, вступающие во взаимодействие с бегущим магнитным полем. В результате создается тяговое усилие, перемещающее индуктор ЛАД (экипаж магнитнолевитационного транспорта). При движении индуктор (экипаж МЛТ) все время меняет свое положение и щетки размыкают стержни,

остающиеся позади транспортного экипажа. Тока в этих стержнях быть не может и не будет электрических потерь мощности, что повышает коэффициент полезного действия тягового линейного асинхронного двигателя и системы МЛТ в целом и снижает расходы при эксплуатации нового вида транспорта.

Значимыми недостатками предложенного ЛАД является наличие трения между щетками и стержнями и искрение в контакте щетка-стержень при разрыве цепи при движении высокоскоростного экипажа МЛТ. Этих недостатков не имеет второй вариант конструкции линейного асинхронного двигателя без ВПКЭ, электропроводящие стержни обмотки вторичного элемента которого замкнуты с одной стороны общей электропроводящей шиной, а с другой стороны между каждой парой стержней расположены магнитоуправляемые контакты (герконы), электрически связанные со стержнями. Конструкция ЛАД представлена на Рис. 2.

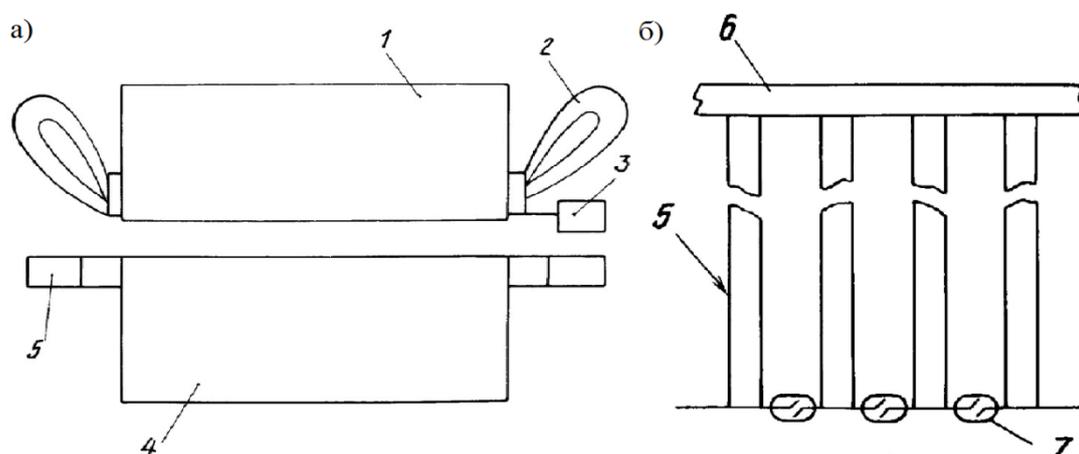


Рис. 2. Линейный асинхронный двигатель с замыкающими герконами, а) и обмотка вторичного элемента, б).

- 1 – индуктор; 2 – трехфазная обмотка индуктора; 3 – постоянный магнит;  
4 – сердечник вторичного элемента; 5 – электропроводящие стержни; 6 – шина;  
7 – магнитоуправляемые контакты (герконы)

Линейный асинхронный двигатель содержит индуктор 1 с ферромагнитным сердечником и трехфазной обмоткой 2. Индуктор ЛАД оборудован постоянным магнитом 3 (Рис. 2 а). Вторичный элемент (путевая структура МЛТ) состоит из ферромагнитного сердечника 4 и обмотки 5 (Рис. 2 б). Обмотка вторичного элемента состоит из электропроводящих стержней 5, замкнутых с одной стороны общей шиной 6 (Рис. 2 б). С противоположной стороны между каждой парой стержней установлены магнитоуправляемые контакты (герконы) 7, электрически соединенные со стержнями обмотки 5. Герконы 7, расположенные под постоянным магнитом 3 (под экипажем МЛТ), замкнуты.

Второй вариант конструкции тягового линейного асинхронного двигателя без ВПКЭ работает следующим образом. Подключение

индуктора к источнику трехфазного напряжения приводит к созданию бегущего магнитного поля, пересекающего стержни обмотки вторичного элемента и наводящего в них электродвижущие силы. Стержни обмотки ВЭ, расположенные пол индуктором образуют короткозамкнутую обмотку, поскольку контакты герконов под действием магнитного поля постоянного магнита будут замкнуты. Под действием ЭДС в обмотке ВЭ потекут токи. Взаимодействие бегущего магнитного поля с токами в обмотке вторичного элемента создает тяговое усилие, перемещающее экипаж магнитнолевитационного транспорта. При движении высокоскоростного транспортного экипажа в набегающих частях вторичного элемента под действием поля постоянного магнита замыкаются контакты новых герконов, образуя короткозамкнутую обмотку в другой части путевой структуры МЛТ, а в сбегающих частях вторичного элемента («освободившихся» из-под индуктора ЛАД) контакты герконов размыкаются и вне пределов индуктора (экипажа) токи протекать не будут. Вторичный продольный краевой эффект в данном случае полностью отсутствует. Сама короткозамкнутая обмотка ВЭ под индуктором движущегося экипажа МЛТ создается без всякого трения, что повышает коэффициент полезного действия линейного асинхронного двигателя.

### Влияние ВПКЭ на работу ЛАД

Токи в электропроводящей части вторичного элемента ЛАД протекают под действием трансформаторной электродвижущей силы и ЭДС «движения». При низких скоростях движения МЛТ большее значение имеет первые из них, а при высоких скоростях – вторые. На основании теоретических положений и экспериментальных данных получено соотношение, позволяющее рассчитывать электрические потери мощности во вторичном элементе, возникающие от действия вторичного продольного краевого эффекта

$$P_{к.э.} = B_{z0} \cdot \Delta_2 \cdot \gamma_2 \cdot v_1^2 \left[ \frac{2,6 \cdot \delta \cdot (v_1 + 3 \cdot f \cdot \delta)}{v_1 + 6 \cdot f \cdot \delta} + \frac{\tau_1 \cdot v_1}{70 \cdot f} \right] \cdot 10^{-5},$$

где  $B_{z0}$  – магнитная индукция в воздушном зазоре в центре индуктора;

$\Delta_2$  – сечение проводящей части ВЭ;

$\gamma_2$  – электропроводность стержней ВЭ;

$v_1$  – скорость движения;

$\delta$  – воздушный зазор;

$f$  – частота тока;

$\tau_1$  – коэффициент, зависящий от электропроводности ВЭ.

Все величины подставляются в формулу в системе СИ, результат получается в «кВт».

Выполненные экспериментальные на дугостаторном стенде исследования показали, что при скорости движения 215 км/ч у ЛАД мощностью 1,5 кВт за счет потерь от действия ВПКЭ коэффициент полезного действия снизился на 12 %.

### Выводы

1. Получено соотношение, позволяющие учитывать влияние вторичного продольного краевого эффекта на работу тяговых линейных асинхронных двигателей МЛТ.

2. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили большое влияние вторичного продольного краевого эффекта на коэффициент полезного действия и тяговое усилие линейного асинхронного двигателя.

3. Предложенные конструкции линейных асинхронных двигателей позволяют исключить влияние ВПКЭ и повысить коэффициент полезного действия ЛАД и системы магнитнолевитационного транспорта в целом.

### Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитнолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М: Физматлит, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: Fizmatlit; 2014. 476 p. (In Russ)]. Доступно по: [https://b-ok.org/book/2901328/800f1a/?\\_ir=1](https://b-ok.org/book/2901328/800f1a/?_ir=1). Ссылка активна на: 03.02.2019.
2. Зайцев А.А., Талашкин Г.Н., Соколова Я.В. Транспорт на магнитном подвесе / под ред. А.А. Зайцева. – СПб: ПГУПС, 2010. – 160 с. [Zaitsev AA, Talashin GN, Sokolova IaV. *Transport na magnitnom podvese*. Zaitsev AA, editor. St. Petersburg: PSTU; 2010. 160 p. (In Russ)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004907216>. Ссылка активна на: 01.02.2019.
3. Магнитнолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева. – М: Физматлит, 2015. – 612 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA, editor. *Magnitolevitatsionnyy transport: nauchnyye problem i tekhnicheskkiye resheniya*. Moscow: Fizmatlit; 2015. 612 p. (In Russ)]. Доступно по: <https://b-ok.org/book/2910926/a2ce27>. Ссылка активна на: 02.02.2019.
4. Зайцев А.А., Морозова Е.И., Талашкин Г.Н., Соколова Я.В. Магнитнолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны / под ред. А.А. Зайцева. – СПб: НП-ПРИНТ, 2015. – 140 с. [Zaitsev AA, Morozova EI, Talashin GN, Sokolova IaV. *Magnitolevitatsionnyy transport v edinoi transportnoi sisteme strany*. Zaitsev AA, editor. St. Petersburg: NP-PRINT; 2015. 140 p. (In Russ)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008161609>.

- Ссылка активна на: 03.02.2019.
5. Зайцев А.А. О современной стадии развития магнитолевитационного транспорта и подходах к выбору специализации и физической основы высокоскоростного движения на направлении Москва–Санкт-Петербург // Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2016. – № 4. – С. 26–33. [Zaitsev AA. O sovremennoy stadii razvitiya magnitolevitatsionnogo transporta i podkhodakh k vyboru spetsializatsii i fizicheskoy osnovy vysokoskorostnogo dvizheniya na napravlenii Moskva–Sankt-Peterburg. *Byulleten' ob'yedinennogo uchenogo soveta of Russian Railways*. 2016;4:26-33. (In Russ)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27472893>. Ссылка активна на: 02.02.2019.
  6. Зайцев А.А. Магнитолевитационные системы и технологии // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С. 69–73. [Zaitsev AA. Magnitolevitatsionnye sistemy i tehnologii. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2014;5:69-73. (In Russ)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21883966>. Ссылка активна на: 03.02.2019.
  7. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А., Морозова Е.И. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы // Известия ПГУПС. – 2014. – № 4. – С. 5–15. [Antonov YuF, Zaitsev AA, Morozova EI. Study of magnetic dynamic levitation and electrodynamic braking of a cargo transport platform. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2014;(4):5-15. (In Russ)]. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-magnitodinamicheskoy-levitatsii-i-elektrodinamicheskogo-tormozheniya-gruzovoy-transportnoy-platformy>. Ссылка активна на: 05.02.2019.
  8. Konyaev AYu, Bagin DN. Modeling an Electrodynamic Separator Based on a Linear Inductor. *Russian Electrical Engineering*. 2018;89(3):168-173. doi: 10.3103/S1068371218030100
  9. Sarapulov FN, Frizen VE, Shvydkiy YL, et al. Mathematical modeling of a linear-induction motor based on detailed equivalent circuits. *Russian Electrical Engineering*. 2018;89(4):270-274. doi: 10.3103/s1068371218040119
  10. Bakhvalov YuA, Gorbatenko NI, Grechikhin VV, et al. Design of optimal electromagnets of magnetic-levitation and lateral-stabilization systems for ground transportation based on solving inverse problems. *Russian Electrical Engineering*. 2017;88(1):15-18. doi: 10.3103/S1068371217010047
  11. Пашков Н.Н. Уравнение движения магнитолевитационного подвижного состава // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 59–69. [Pashkov NN. The equation of motion of the magnetic rolling stock. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(1):59-69. (In Russ., In Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst20151159-69
  12. Филиппов Д.М. Особенности моделирования магнитного поля в электромеханических узлах магнитолевитационной транспортной системы методом вторичных источников // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 49–61. [Filippov DM. Features of the simulation of the magnetic field in the electromechanical units of a magnetic-levitation transport system by the method of secondary sources. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(2):49-61. (In Russ., In Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst20151249-61
  13. Лapidус Б.М., Лapidус Л.В. Железнодорожный транспорт: философия будущего. М: Прометей, 2015. – 232 с. [Lapidus BM, Lapidus LV. *Zeleznodoroznyi transport: filosofia buduchego*. Moscow: Prometei; 2015. 232 p.

- (In Russ)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23731956>. Ссылка активна на: 02.02.2019.
14. Калнинь Т.К. Линейные индукционные машины с поперечным магнитным потоком. Рига: Зинатне, 1980. – 170 с. [Kalnin' TK. *Lineynyye induktsionnyye mashiny s poperechnym magnitnym potokom*. Riga: Zinatne; 1980. 232 p. (In Russ)]. Доступно по: <https://ru.b-ok.cc/book/2760544/6d2e3d>. Ссылка активна на: 03.02.2019.
  15. Соломин А.В. Линейные асинхронные тяговые двигатели для высокоскоростных поездов и их математическое моделирование. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2008. – 204 с. [Solomin AV. *Lineynyye asinkhronnyye tyagovyye dvigateli dlya vysokoskorostnykh poyezdov i ikh matematicheskoye modelirovaniye*. Rostov-on-Don: RSTU; 2008. 204 p. (In Russ)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004131632>. Ссылка активна на: 04.02.2019.
  16. Lim J, Jeong J-H, Kim C-H, et al. Analysis and experimental evaluation of normal force of linear induction motor for Maglev vehicle. *IEEE Transactions on Magnetics*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); 2017;53(11):1-4. doi: 10.1109/tmag.2017.2699694
  17. Ji W-Y, Jeong G, Park C-B, et al. A study of non-symmetric double-sided linear induction motor for Hyperloop All-In-One System (propulsion, levitation, and guidance). *IEEE Transactions on Magnetics*. 2018;54(11):1-4 doi: 10.1109/tmag.2018.2848292
  18. Lv G, Liu Z, Sun S. Analysis of torques in single-side linear induction motor with transverse asymmetry for linear metro. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); 2016;31(1):165-173. doi: 10.1109/tec.2015.2470561
  19. Yonezu T, Watanabe K, Suzuki E, Sasakawa T. Study on Electromagnetic Force Characteristics Acting on Levitation/Guidance Coils of a Superconducting Maglev Vehicle System. *IEEE Transactions on Magnetics*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); 2017;53(11):1-5. doi: 10.1109/tmag.2017.2697002

#### **Сведения об авторах:**

**Соломин Владимир Александрович**, доктор технических наук, профессор;  
адрес: 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного  
Ополчения, д. 2;

eLibrary SPIN:6785-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;

E-mail: [ema@rgups.ru](mailto:ema@rgups.ru)

**Соломин Андрей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN:7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;

E-mail: [vag@kaf.rgups.ru](mailto:vag@kaf.rgups.ru)

**Чехова Анастасия Алановна**, аспирант;

eLibrary SPIN: 8201-7660; ORCID: 0000-0002-3410-3687;

E-mail: [ema@rgups.ru](mailto:ema@rgups.ru)

**Замшина Лариса Леонидовна**, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 8703-1347; ORCID: 0000-0001-5374-9443;

E-mail: [ema@rgups.ru](mailto:ema@rgups.ru)

**Трубицина Надежда Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 4192-0487; ORCID: 0000-0001-6640-8306;

E-mail: [ema@rgups.ru](mailto:ema@rgups.ru)

#### **Information about the authors:**

**Vladimir A. Solomin**, Doctor of Technological sciences, Professor;

address: 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia;

eLibrary SPIN: 6785-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;

E-mail: ema@rgups.ru

**Andrei V. Solomin**, Candidate of Technological sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;

E-mail: vag@kaf.rgups.ru

**Anastasia A. Chekhova**, Graduate;

eLibrary SPIN: 8201-7660; ORCID: 0000-0002-3410-3687;

E-mail: ema@rgups.ru

**Larisa L. Zamchina**, Candidate of Technological sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 8703-1347; ORCID: 0000-0001-5374-9443;

E-mail: ema@rgups.ru

**Nadezda A. Trubitsina**, Candidate of Technological sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 4192-0487; ORCID: 0000-0001-6640-8306;

E-mail: ema@rgups.ru

#### **Цитировать:**

Соломин В.А., Соломин А.В., Чехова А.А. и др. Линейные асинхронные двигатели без продольного краевого эффекта // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 60–69. doi: 10.17816/transsyst20195260-69

#### **To cite this article:**

Solomin VA, Solomin AV, Chekhova AA, et al. Linear induction motors without longitudinal edge effect. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):60-69. doi: 10.17816/transsyst20195260-69

## Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление «Электротехника»

UDC [УДК] 538.31.001.2

DOI 10.17816/transsyst20195270-82

© К. Э. Воеводский<sup>1</sup>, В. М. Стрепетов<sup>2</sup>, Г.Е. Серeda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>2</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

### ЛЕВИТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСПОРТНОЙ УСТАНОВКИ С ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМ ПОДВЕСОМ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОДОЛЬНОГО СТЫКА В ПУТЕВОМ ПОЛОТНЕ

**Цель:** предложить техническое решение, позволяющего обеспечить боковую стабилизацию экипажа с электродинамическим подвесом. Разработка метода расчёта левитационных характеристик транспортной установки с электродинамическим подвесом при наличии продольного стыка в путевом полотне. Анализ результатов теоретических исследований.

**Методы:** в статье использовались методы теории электромагнитного поля, обобщенные функции, преобразование Фурье, аналитические и численные методы определения квадратур. Программа для ПЭВМ разрабатывалась на языке Фортран.

**Результаты:** для обеспечения боковой стабилизации экипажа с электродинамическим подвесом предложено ввести в структуру путевого полотна продольный изоляционный стык. Создана математическая модель исследуемой системы электродинамического подвеса в приближения бесконечно широкого полотна прямоугольного сечения.

Для предельного случая, когда ширина стыка стремится к нулевому значению, а экипажные электромагниты имеют прямоугольную форму на основе применения преобразования Фурье получено решение уравнений, описывающих принятую математическую модель: выражение вектора магнитной индукции и электродинамической силы в квадратурах. Численное интегрирование этих уравнений выполнялось посредством применения формулы Гаусса и метода Филона.

Результаты расчетов позволили получить ряд графических зависимостей левитационных характеристик от величины бокового смещения экипажного электромагнита относительно симметричного положения.

**Заключение:** полученные результаты проведенного исследования полностью отвечают поставленной цели по определению параметров боковой стабилизации экипажа с электродинамическим подвесом с путевым полотном, содержащим продольный стык в рамках принятых допущений. Сравнение предложенного способа с другими предлагавшимися ранее способами стабилизации не позволяет выявить решающих преимуществ или недостатков нового способа. В большинстве случаев его недостатком является *относительно* низкое левитационное качество. Однако оно существенно возрастает, если движение экипажа ВСНТ происходит преимущественно с высокой скоростью, при которой сила аэродинамического сопротивления превалирует над силой электродинамического торможения.

Столь же относительным является и достоинство рассматриваемой системы – *высокая боковая жёсткость*. Причина этого в том, что требования на боковую жёсткость могут быть количественно сформулированы лишь применительно к *конкретной трассе* ВСНТ с учётом графика движения и других факторов. Как известно, главными дестабилизирующими воздействиями в боковом направлении являются сила инерции при движении по криволинейному участку и боковой ветер. Свою роль в выборе системы стабилизации могут сыграть и задачи, решаемые другими подсистемами системы ВСНТ. Играет определенную роль также принцип действия и конструкция системы тяги. Из сказанного ясно, что окончательный выбор системы боковой стабилизации на настоящем этапе исследований был бы преждевременным. Предложенный и изученный в этой статье новый способ стабилизации следует рассматривать как ещё один из возможных наряду с предлагавшимися ранее. Ответ на вопрос о конкурентоспособности нового способа должен быть связан с характеристиками конкретной трассы ВСНТ. Необходимо и дальнейшее уточнение результатов, при более строгом учёте краевого эффекта, а также рассмотрением случая неизолированного стыка.

**Ключевые слова:** транспортная установка, электродинамический подвес, продольный стык, боковая стабилизация, электромагнитные характеристики, обобщенные функции, преобразование Фурье.

## Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field “Electrical Engineering”

© Konstantin E. Voevodskii<sup>1</sup>, Vladimir M. Strepetov<sup>2</sup>, Gennadii E. Sereda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State University

<sup>2</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
(St. Petersburg, Russia)

### LEVITATION CHARACTERISTICS OF ELECTRODYNAMIC SUSPENSION TRANSPORT RUNNING ON GUIDEWAY WITH LONGITUDINAL JOINT

**Aim:** to propose a technical solution to ensure the lateral stabilisation of the vehicle with an electrodynamic suspension. Development of a method for calculating the levitation characteristics of a transport unit with an electrodynamic suspension running on a guideway with a longitudinal joint. Analysis of the results of theoretical studies.

**Methods:** in the article, the methods of the electromagnetic field theory, generalised functions, Fourier transform, analytical and numerical methods for determining quadratures are used. The software was developed in the Fortran language.

**Result:** to ensure lateral stabilisation of the vehicle with an electrodynamic suspension, it was proposed to introduce a longitudinal insulating joint into the structure of the guideway. A mathematical model is proposed for this system of electrodynamic suspension in approximation of an infinitely wide track structure of rectangular cross section.

For the ultimate case when the width of the joint tends to zero, and the vehicle electromagnets have a rectangular form based on the application of the Fourier transform, the solution of the equations was obtained describing the adopted mathematical model: the

expression of the vector of magnetic induction and electrodynamic force in the quadrature. Numerical integration of these equations was performed by applying the Gauss formula and the Philo method.

The results of the calculations allowed us to obtain a number of graphical dependencies of the levitation characteristics on the value of the lateral displacement of the vehicle electromagnet relatively to symmetrical position.

**Conclusion:** thus, the obtained results of the study fully meet the goal of determining the parameters of the laterally stabilising the electrodynamic vehicle with the guideway equipped with a longitudinal joint under the assumptions made. Comparison of the proposed method with other proposed stabilisation methods does not reveal the decisive advantages or disadvantages of the new method. In most cases, its most serious weakness is its *relatively* low levitation quality. However, it is significantly reduced if the movement of the high-speed ground transport occurs predominantly at high speed, at which the force of aerodynamic drag prevails over the force of electrodynamic braking.

Of the same relativity is the advantage of the system proposed, that is *great lateral rigidity*. The reason for this is that the requirements to the *lateral rigidity* can be formulated quantitatively only in relation to the particular high-speed ground transport line, taking into account the traffic schedule and other factors. As it is known, the main destabilising influences in lateral direction are the inertia at curves and lateral wind. The tasks solved by other subsystems of the high-speed transport line, can play their certain role in choosing of the stabilisation system as well. It is clear from the above that the final decision on the stabilisation system at this stage of research would be premature. The new stabilisation method suggested and studied in this paper should be considered only as another possible together with the earlier proposed one. The answer to the question about the competitiveness of the new method should be related to the characteristics of the particular high-speed ground transport line. Further specification of the results is required considering the edge effect, as well the uninsulated joint case.

**Keywords:** transport unit, electrodynamic suspension, longitudinal joint, lateral stabilisation, electromagnetic characteristics, generalised functions, Fourier transform.

## ВВЕДЕНИЕ

Для большинства промышленно развитых стран мира характерен неуклонный рост пассажирских перевозок, который может быть обеспечен за счёт повышения провозной и пропускной способности транспортных систем. При этом одновременно предполагается и повышение качества транспортного обслуживания: уменьшение затрат времени на поездку «от двери до двери», уменьшение наполняемости подвижного состава в часы «пик», сокращение межпоездных интервалов.

Одним из альтернативных ответов на данную задачу является создание систем высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ) с использованием магнитного подвешивания транспортной установки. Создание ВСНТ на магнитном подвесе способствует экономическому росту за счёт внедрения новейших достижений научно-технического прогресса и содействует укреплению престижа России как одной из ведущих стран с высокоразвитыми транспортными системами [1-5].

Используются преимущественно два типа магнитных подвесов – электромагнитный (ЭМП) и электродинамический (ЭДП).

Действие ЭДП основано на использование сил отталкивания, возникающих между магнитным полем, размещённых на подвижном составе сверхпроводящих электромагнитов постоянного тока и индуктированными ими токами в путевом немагнитном полотне сплошного или дискретного типов. ЭДП по сравнению с ЭМП позволяет получить на порядок большую высоту подвешивания (100-200 мм). ЭДП присуще естественная вертикальная устойчивость.

Существует много способов, обеспечивающих боковую стабилизацию экипажа транспортных систем с ЭДП. Однако каждому из них присуще определенные недостатки. В связи, с чем актуальна задача по поиску альтернативных методов боковой стабилизации экипажа данной транспортной системы.

Целью предлагаемой работы является получение теоретических и технических решений, обеспечивающих эту задачу.

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Конструктивная схема транспортной системы ЭДП, путевое полотно которой содержит продольный стык, представлено на Рис. 1.

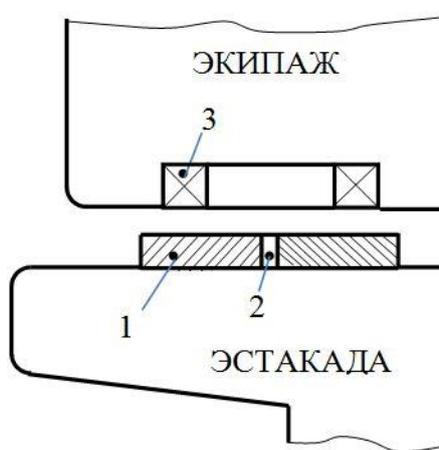


Рис.1. Конструктивная схема транспортной системы с ЭДП при наличии продольного стыка в полотне

На Рис. 1 цифрами обозначены: 1 – путевое полотно, 2 – продольный стык в полотне, 3 – электромагнит подвеса.

Расчетная схема для определения левитационных характеристик транспортной установки с ЭДП при наличии продольного стыка в путевом полотне представлена на Рис. 2.

Будем исходить из предположения, что наличие продольного стыка в путевом полотне обеспечит данной транспортной системе с ЭДП боковую устойчивость.

Для обоснования данного предположения ограничимся рассмотрением приближения бесконечно широкого полотна.

Будем считать, что полотно представляет собой слой между плоскостями  $z = 0$  и  $z = T$  ( $T$  – толщина полотна), воздушный зазор в полотне занимает область  $-a < y < a$  (таким образом, ширина зазора равна  $2a$ ), экипажный электромагнит движется вдоль оси  $x$  в плоскости  $z = h > T$ .

В [6] предложен *метод условной границы*, который позволяет свести задачу расчета электромагнитного поля в описанной системе к расчету полей, возбуждаемых в плоском слое  $0 \leq z \leq T$ , сплошь заполненном неоднородной проводящей средой. Для данного случая удельная проводимость среды в этом слое зависит только от координаты  $y$ , и эта зависимость имеет вид (1)

$$\sigma(y) = \sigma_0 k(y), \quad k = \begin{cases} 1 & \text{при } |y| > a \\ 0 & \text{при } |y| < a \end{cases}. \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_0$  – удельная проводимость материала полотна.

Расчетная схема для определения левитационных характеристик транспортной установки с ЭДП при наличии продольного стыка в путевом полотне представлена на Рис.2.

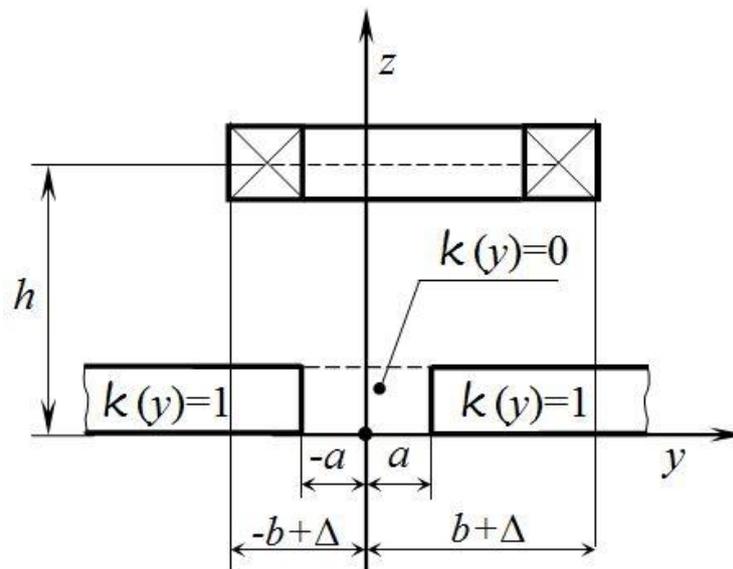


Рис. 2. Расчетная схема транспортной системы ЭДП с продольным стыком в путевом полотне

Задача расчета полей в неоднородном проводящем слое, удельная проводимость которого может зависеть от всех трех координат, рассмотрена в [7], где получено основное интегральное уравнение теории

ЭДЛ, в котором роль неизвестной функции играет фурье-образ вектора напряженности электрического поля  $E$  в слое  $0 \leq z \leq T$ .

В [8] подробно изучен тот частный случай (поперечный стык), когда удельная проводимость зависит только от координаты  $x$ , причем эта зависимость имеет вид (1) с заменой  $y$  на  $x$ . Показано, что при реальных значениях параметров системы к данной задаче применимо приближение тонкого полотна (глубина скин-слоя больше толщины полотна), и в этом приближении получено одномерное интегральное уравнение для фурье-образа  $x$ -компоненты вектора  $E$ .

Повторяя аналогичные рассуждения и выкладки применительно к случаю продольного стыка, можно получить следующее интегральное уравнение для фурье-образа  $y$ -компоненты вектора  $E$ .

$$u(y) = \Phi(y) + \frac{i\xi}{\pi r} \int u(y') [K_0(|\xi(y-y')|) - H(y)K_0(|\xi(y'-a)|) - H(-y)K_0(|\xi(y'+a)|)] dy' . \quad (2)$$

Здесь  $u(y)$  – фурье-образ  $E_y$  по переменной  $x$ ;  $\xi, \eta$  – параметры преобразования Фурье по переменным  $x$  и  $y$ ;  $k = \xi e_x + \eta e_y$ ,

$$k = |k| = \sqrt{\xi^2 + \eta^2};$$

$\Phi(y) = f(y) - H(y)f(a) - H(-y)f(-a)$ ;  $f(y)$  – обратное фурье преобразование функции  $f(\eta) = (\mu_0/2k)v\xi^2 V(k)e^{-k\eta}$ ;  $r = 2/l$ ;  $l = \mu_0\sigma_0vT$ ;  $v$  – скорость экипажа,  $V(k)$  – фурье-образ по  $x$  и  $y$  потенциальной функции тока, характеризующей форму и н.с. экипажного электромагнита [9];

$$H(y) = \begin{cases} e^{-|\xi y|}/(2\text{ch}(\xi a)) & y > a \\ 0 & y < -a \end{cases}; K_0 - \text{модифицированная функция}$$

Ханкеля нулевого порядка [10]. При выводе этого уравнения использованы также данные [11].

### Расчет левитационных характеристик

Ограничимся рассмотрением случая, при котором ширина воздушного зазора  $2a$  мала по сравнению с прочими характерными размерами системы. В этом случае влияние стыка связано главным образом не с отсутствием проводящей среды в зазоре  $|y| < a$ , а с искажением картины вихревых токов в путевой структуре, которое вызвано отсутствием электрического контакта между областями  $y > a$  и  $y < -a$ . По этой причине уравнение (2) можно заменить его предельным случаем при  $a \rightarrow 0$ , то есть – уравнением:

$$u(y) = f(y) - f(0)e^{-|\xi, y|} + \frac{i\xi}{\pi r} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} K_0(|\xi(y-y')|)u(y') - e^{-|\xi, y|} \int_{-\infty}^{\infty} K_0(|\xi y|)u(y) dy \right] \quad (3)$$

Уравнение (3) решается в квадратурах. Для этого удобно проделать в выражении (3) преобразование Фурье по переменной  $y$ . Первый интеграл в формуле (3) представляет собой свёртку по переменной  $y$ , а второй – скалярное произведение в пространстве  $L_2(-\infty < y < \infty)$  функций  $K_0(|\xi y|)$  и  $u(y)$ , поэтому в результате преобразования Фурье они перейдут, соответственно, в произведение и скалярное произведение в  $L_2(-\infty < \eta < \infty)$  фурье-образов названных функций. Выразив значение  $f(0)$  через фурье-образ функции  $f$  и пользуясь данными [11], из (3) можно получить уравнение

$$u(\eta) = f(\eta) - \frac{|\xi|}{\pi k^2} \int_{-\infty}^{\infty} f(\eta) d\eta + \frac{i\xi}{r} \left[ \frac{u(\xi)}{k} - \frac{|\xi|}{\pi k^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(\eta)}{k} \right].$$

Обособив здесь  $u$ , стоящее вне интеграла, придём к интегральному уравнению с вырожденным ядром, которое решается стандартным способом [12, 13, 14], и решение которого имеет вид

$$u(\eta) = \frac{r}{kr - i\xi} \left[ kf(\eta) - \frac{\gamma|\xi| \int_{-\infty}^{\infty} kf(\eta)/(kr - i\xi) d\eta}{k(\pi + i \operatorname{sign}(\xi) \ln(\lambda + 1)/(\gamma - 1))} \right]; \quad \gamma = \sqrt{r^2 + 1}. \quad (4)$$

Напомним, что функция  $u$  есть  $y$ -компонента искомого вектора  $\mathbf{E}$ . Зная её можно найти все компоненты векторов. Его  $x$ -компонента определяется следующим выражением  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  [8]. Затем, используя подход [9], аналогично тому, как это сделано в [8], найти силу, действующую на экипажный электромагнит.

Опуская промежуточные выкладки, приведем результирующие формулы, определяющие эту силу

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_0 + \mathbf{f}; \quad \mathbf{F}_0 = 4\mu_0 l \left( \frac{l}{2} \mathbf{e}_z - \mathbf{e}_x \right) \int_0^{\infty} d\xi \int_0^{\infty} d\eta \frac{k^2 \xi^2 e^{-2kh} |\mathbf{V}(\mathbf{k})|^2}{4k^2 - i^2 \xi^2}, \quad (5)$$

$$\mathbf{f} = \frac{\mu_0 \gamma}{2} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \frac{\xi^2}{i\pi \operatorname{sign}(\xi) + \ln \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} d\eta_1 \mathbf{G}_1^- \frac{e^{-k_1 h} \mathbf{V}(\mathbf{k}_1)}{k_1 r - i\xi} \int_{-\infty}^{\infty} d\eta_2 \frac{e^{-k_2 h} \mathbf{V}(\mathbf{k}_2)}{k_2 r - i\xi} \right\} \quad (6)$$

$$\mathbf{k}_{1,2} = \xi \mathbf{e}_x + \eta_{1,2} \mathbf{e}_y; \quad k_{1,2} = |\mathbf{k}_{1,2}|; \quad \mathbf{G}_1^- = i\xi \mathbf{e}_x + \eta_1 \mathbf{e}_y - k_1 \mathbf{e}_z.$$

Конкретизируем полученные соотношения применительно к случаю прямоугольной формы экипажного электромагнита длины  $2a$ , ширины  $2b$ . Его боковое смещение относительно плоскости  $y = 0$  обозначим через  $\Delta$  (см. рис.2.). Для описываемого случая

$$V(k) = \frac{2I}{\pi} \frac{\sin a\xi \cdot \sin b\eta}{\eta\xi} e^{-i\eta\Delta}.$$

Подставляя это выражение в (6), можно получить после ряда элементарных преобразований

$$\begin{cases} f_x = C \int_0^\infty \xi \sin^2(a\xi) \operatorname{Im}(\alpha I_1) d\xi; & f_y = C \int_0^\infty \xi \sin^2(a\xi) \operatorname{Re}(\alpha I_1 I_2) d\xi; \\ f_z = C \int_0^\infty \sin^2(a\xi) \operatorname{Re}(\alpha I_1 I_3) d\xi; & \partial f_y / \partial \Delta = C \int_0^\infty \sin^2(a\xi) \operatorname{Re}(\alpha (I_1 I_4 - I_2^2)) d\xi. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь  $C = \frac{16\mu_0 \gamma I^2}{\pi^2}$ ;  $\alpha = \left( \ln \frac{\gamma+1}{\gamma-1} + i\pi \right)^{-1}$ ;  $I_i(\xi) = \int_0^\infty \frac{J_i(\xi) \sin(b\eta)}{kr - i\xi} e^{-k\eta} d\eta$  ( $i=1, \dots, 4$ );

$$J_1(\eta) = \cos(\Delta\eta)/\eta; \quad J_2(\eta) = \sin(\Delta\eta); \quad J_3(\eta) = k J_1(\eta) \quad J_4(\eta) = \eta \cos(\Delta\eta).$$

Величина  $\partial f_y / \partial \Delta$  имеет смысл боковой жёсткости подвеса, её выражение получено дифференцированием формулы для  $f_y$ .

Подстановка представленного выше конкретного выражения для  $V(k)$  в формулу (5) приводит к её кардинальному упрощению: перейдя в интеграле (5) к полярным координатам  $k, \varphi$  ( $\xi = k \cos \varphi, \eta = k \sin \varphi$ ) можно заметить, что интеграл по  $k$  вычисляется аналитически, в результате чего формула для электродинамической силы  $F_0$  приобретает следующий вид

$$F_0 = \frac{\mu_0 l}{\pi^2} \left( \frac{l}{2} \mathbf{e}_z - \mathbf{e}_z \right) \int_0^{\pi/2} \ln \left\{ \frac{(1 + A^2 \cos^2 \varphi)^2 (1 + B^2 \sin^2 \varphi)^2}{(1 + (A \cos \varphi + B \sin \varphi)^2)(1 + (A \cos \varphi - B \sin \varphi)^2)} \right\} \times \\ \times \frac{d\varphi}{\sin^2 \varphi (4 + l^2 \cos^2 \varphi)} \quad (8)$$

Здесь  $A = a/h, B = b/h$ .

### Методика численных расчетов

Для проведения конкретных расчётов по представленным формулам осталось рационально выбрать метод численного интегрирования. Расчет интеграла (8) не вызывает трудностей, для него можно воспользоваться любой несложной квадратурной формулой. Фактически применялась

формула Гаусса с десятью или двадцатью четырьмя (в зависимости от конкретных значений параметров) узлами.

Расчет интегралов, содержащихся в (7), представляет большую трудность вследствие бесконечности промежутка интегрирования и быстрой осцилляции подынтегральной функции. Для расчета интегралов такого типа целесообразно использовать метод Филона [15]. Отметим, что в подынтегральном выражении для  $I_1(\xi)$  имеется устранимая особенность:  $\sin b\eta$ , поэтому при расчёте этого интеграла по методу Филона необходимо отделить некоторую малую окрестность нуля и интеграл по этой окрестности вычислять отдельно.

### Анализ результатов расчетов

Результаты проведенных расчетов представлены на Рис. 3, 4. Все графики на этих рисунках изображают зависимость левитационных характеристик от величины бокового смещения экипажного электромагнита относительно симметричного положения. Величина смещения отложена в относительных единицах  $\Delta/2b$ , где  $2b$  – ширина электромагнита. Расчёты отвечают следующему набору данных: высота подвеса  $h=22$  см, длина магнита  $2a=1$  м, ширина магнита  $2b=30$  см, толщина полотна – 5 мм, удельная проводимость материала путевого полотна  $\sigma = 3,4 \cdot 10^7$  (Ом·м).

Поскольку цель введения продольного стыка состоит в придании ЭДП боковой устойчивости, наибольший интерес представляет боковая, то есть  $u$ -компонента левитационной силы. Зависимость этой компоненты от величины смещения представлена на Рис. 3.

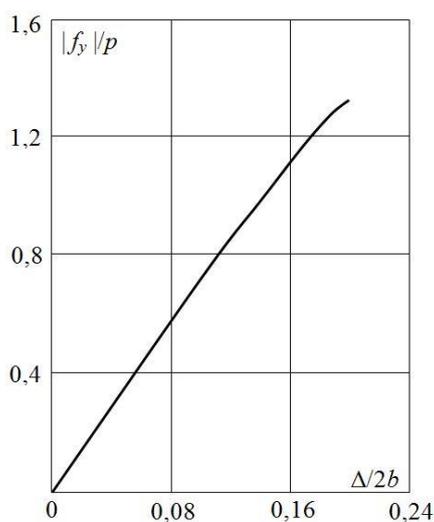


Рис. 3.  
Зависимость возвращающей силы от бокового смещения

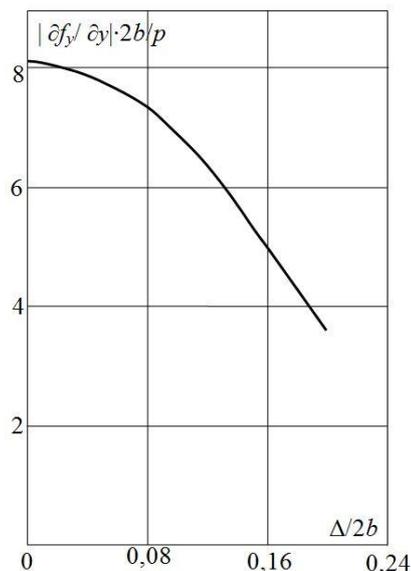


Рис. 4  
Зависимость боковой жесткости от смещения  $\Delta$

Как видно из этого графика, система подвеса с продольным стыком в полотне обладает боковой устойчивостью (компонента  $f_y$  носит характер возвращающей силы).

Речь при этом идёт о статической устойчивости. При малых смещениях зависимость  $f_y$  от  $\Delta$  близка к линейной, с увеличением смещения возвращающая сила увеличивается несколько медленнее линейной функции. По оси ординат на рис. 3 отложено отношение боковой силы к весу экипажа, приходящемуся на один магнит –  $P$ , вес этот считается равным подъёмной силе при нулевом смещении. Кривая на рис.4 представляет зависимость боковой жёсткости от смещения  $\Delta$ . Наибольшей боковой жёсткостью подвес обладает при нулевом смещении.

Эта жёсткость ненамного превосходит 0,08 веса экипажа при смещении на одну сотую ширины магнита.

Кривые на Рис. 3, 4 получены из расчётов по представленным выше формулам, отвечающим случаю бесконечно широкого полотна. Поскольку в при такой расчётной модели краевой дестабилизирующий эффект не проявляется, то есть основания полагать, что краевой эффект снизит значение возвращающей силы и боковую жёсткость, тем не менее, система ЭДП с продольным стыком сохранит устойчивость в боковом направлении.

Сравнение предлагаемого способа боковой стабилизации с иными способами приводит к выводу о том, любой из известных способов стабилизации приводит к:

- 1) усложнению конструкции подвеса;
- 2) ухудшению других левитационных характеристик ЭДП.

Рассматриваемый способ стабилизации не является исключением. С точки зрения усложнения конструкции подвеса стабилизация с помощью продольного стыка обладает заметным преимуществом перед другими способами поскольку экипажная часть системы не изменяется вовсе, расход материала на единицу длины трассы остаётся прежним, а усложнение путевого полотна минимально.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выражения (5 и 6-7) полностью решают поставленную задачу по определению характеристик боковой стабилизации экипажа с электродинамическим подвесом при наличии продольного стыка в путевом полотне в рамках принятых допущений.

Сравнение с большинством других предлагавшихся способов стабилизации также не позволяет выявить решающих преимуществ или недостатков нового способа. В большинстве случаев его серьёзным недостатком является относительно низкое левитационное качество. Этот недостаток в значительной степени теряет своё значение, если движение экипажа ВСНТ происходит преимущественно с высокой скоростью, при

которой сила аэродинамического сопротивления превалирует над силой электродинамического торможения.

Столь же условным является и упомянутое выше достоинство рассматриваемой системы – *высокая боковая жёсткость*. Причина в том, что требования на боковую жёсткость могут быть количественно сформулированы лишь применительно к конкретной трассе ВСНТ с учётом графика движения и других факторов. Как известно, главными дестабилизирующими воздействиями в боковом направлении являются сила инерции при движении по криволинейному участку и боковой ветер. Интенсивность первого из этих факторов зависит от кривизны пути и скорости движения, второго – от того движется ли экипаж в туннеле, углублении, на уровне земли, или по высокой эстакаде, от формы корпуса экипажа, от требований всепогодности.

Свою роль в выборе системы стабилизации могут сыграть и задачи, решаемые другими подсистемами системы ВСНТ. Игрет роль также принцип действия и конструкция системы тяги. Так, если тяга осуществляется посредством СЛД с вертикальными обмотками, наиболее привлекательным является способ стабилизации с помощью КССНТ (комбинированная система стабилизации, направления, тяги) [16]. В то же время вертикальное расположение электромагнитов тяги накладывает определённые ограничения на конструкцию экипажа и исключает возможность использования СЛД для создания дополнительного подъемного усилия, а последнее могло бы, в частности смягчить недостатки способа стабилизации с помощью стыка в части подъемной силы и левитационного качества.

Из сказанного ясно, что окончательный выбор системы боковой стабилизации на настоящем этапе исследований был бы преждевременным. Предложенный и изученный в этой статье новый способ стабилизации следует рассматривать как ещё один из возможных наряду с предлагавшимися ранее. Ответ на вопрос о конкурентоспособности нового способа должен быть привязан к характеристикам конкретной трассы ВСНТ. Необходимо и дальнейшее уточнение результатов, связанное с более строгим учётом краевого эффекта, а также рассмотрением случая неизолированного стыка.

### Библиографический список / References

1. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология. – М: Физматлит, 2014. – 476 с. [Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya*. Moscow: Fizmatlit; 2014. 456 p. (In Russ.)]. Доступно по: [https://b-ok.org/book/2901328/800f1a/?\\_ir=1](https://b-ok.org/book/2901328/800f1a/?_ir=1). Ссылка активна на: 03.02.2019.
2. Зайцев А.А., Талашкин Г.Н., Соколова Я.В. Транспорт на магнитном подвесе / под ред. А.А. Зайцева. – СПб: ПГУПС, 2010. – 160 с. [Zaitsev AA, Talashkin GN,

- Sokolova IaV. Transport na magnitnom podvese. Zaicev AA, editor. St. Petersburg: PGUPS; 2010. 160 p. (In Russ.).
3. Зайцев А.А. Контейнерный мост Санкт-Петербург – Москва на основе левитации Труды 2-ой Международной научной конференции «Магнитолевитационные и транспортные системы и технологии. МТСТ'14». Санкт-Петербург, 17–20 июня 2014 года / под ред. проф. Ю. Ф. Антонова, Киров: МЦНИП, 2014. – С. 11–23. [Zaitsev AA. Konteineranii most Sankt-Peterburg – Moskva na osnove levitacii. In: Antonov YuF, editor. Proceedings of the 2nd International Scientific Conference “Magnitolevitacionnie transportnie sistemi i tehnologii. MTST'14”. 2014, Jun 17-20; St. Petersburg; 2014. pp. 11-23. (In Russ.)]
  4. Антонов Ю.Ф., Никитин В.В., Хожайнов А.И. Технология HSST в проектах LINIMO и ROTEM. Труды 2-ой Международной научной конференции «Магнитолевитационные и транспортные системы и технологии. МТСТ'14». Санкт-Петербург, 29–31 октября 2013 года / под ред. проф. Ю. Ф. Антонова. – СПб: Pudra, 2013. – С. 133–137. [Antonov YuF, Nikitin VV, Hojainov AI. Tehnologiya HSST v proektah LINIMO i ROTEM In: Antonov YuF, editor. Proceedings of the 2nd International Scientific Conference “Magnitolevitacionnie transportnie sistemi i tehnologii. MTST'13”. 2014 Jun 17-20; St. Petersburg: Pudra; 2013. pp. 133-137. (In Russ.)]
  5. Гулин С.А., Никитин В.В., Середа Г.Е. и др. Система электроснабжения собственных нужд высокоскоростных магнитолевитационных экипажей с линейным синхронным тяговым приводом // Транспортные системы и технологии. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 70–83. [Gulin SA, Nikitin VV, Sereda GE, Sereda EG. Power supply system of own needs of MAGLEV vehicles with linear synchronous traction drive. *Transportation Systems and Technology*. 2016;2(3):70-83. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20162370-83.
  6. Воеводский К.Э., Стрепетов В.М. Метод условной границы // Транспортные системы и технологии. – 2016. – № 4. – С. 133–144. [Voevodskii KE, Strepetov VM. The method of conditional boundary. *Transportation Systems and Technology*. 2016;2(3):133-144. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst201623133-144.
  7. Воеводский К.Э. Интегральное уравнение для расчета квазистационарного электромагнитного поля в неоднородном проводящем слое // Известия вузов «Электромеханика». – 1990. – № 2. – С. 13–18. [Voevodskii KE. Integralnoe uravnenie dlya rascheta kvazistacionarnogo elektromagnitnogo polya v neodnorodnom provodyaschem sloe. *Izvestiya vuzov “Elektromehanika”*. 1990;2:13-18. (In Russ.)]
  8. Воеводский К.Э., Стрепетов В.М. Влияние стыков в путевой структуре на характеристики системы электродинамической левитации // Электричество. – 2017. – № 11. – С. 53–60. [Voevodskii KE, Strepetov VM. The Influence of Joints in the Track Structure on the Electrodynamics Levitation System Performance. *Elektrichestvo*. 2017; 11:53-60. (In Russ.)]. doi: 10.24160/0013-5380-2017-11-53-60.
  9. Воеводский К.Э., Мелик-Бархударян В.К. О расчете магнитного поля заданной системы токов // Известия Академии наук СССР «Энергетика и транспорт». – 1989. – № 4. – С. 166–169. [Voevodskii KE, Melik-barhudaryan VK. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 1989;4:166-169. (In Russ.)].
  10. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 2 т. Т. 2. – М: Наука, 1966. – 800 с. [Fikhtengol's GM. *Kurs differencial'nogo i integral'nogo ischisleniya*. Vol. 2. Moscow: Nauka; 1966. 800 p. (In Russ.)].
  11. Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований. Т.1. – М: Наука, 1969. – 110 с. [Beitmen G, Erdeii A. *Tablici integralnih preobrazovanii*. Vol. 1. Moscow: Nauka; 1969. 110 p. (In Russ.)].

12. Забрейко П.П., Кошелев А.И., Красносельский М.А. и др. Интегральные уравнения. – М: Наука, 1968, 448 с. [Zabreiko PP, Koshelev AI, Krasnoselsky MA, et al. *Integralnie uravneniya*. Moscow: Nauka; 1968. 448 p. (In Russ.)].
13. Краснов М.Л. Интегральные уравнения. Введение в теорию. – М: Наука, 1975. – 302 с. [Krasnov ML. *Integralnie uravneniya. Vvedenie v teoriyu*. Moscow: Nauka; 1975. 302 p. (In Russ.)].
14. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. IV. – М: Наука, 1974, – С. 339–387. [Smirnov VI. *Kurs visshei matematiki*. Vol. IV. Moscow: Nauka; 1974. 387 p. (In Russ.)].
15. Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырский П.И. Вычислительные методы, Т. 1. – М: Наука, 1976 – 304 с. [Krilov VI, Bobkov VV, Monastirskii PI. *Vichislitelnye metodi*. Vol.1. Moscow: Nauka; 1976, 304 p. (In Russ.)].
16. Дроздов С.В., Матин В.И., Чернышёв С.В. Характеристики систем синхронной тяги и направления экипажей высокоскоростного транспорта // Известия вузов «Электромеханика». – 1983. – № 2. – С. 43–47. [Drozdov SV, Matin VI, Chernyshev SV. *Harakteristiki sistem sinhronnoi tyagi i napravleniya ekipazhei visokoskorostnogo transporta*. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika*. 1990;2:13-18. (In Russ.)].

**Сведения об авторах:**

**Воеводский Константин Эммануилович**, к.т.н., доцент;  
eLibrary SPIN: 2579-7541; ORCID: 0000-0002-0519-5527;  
E-mail: kv5832@mail.ru

**Стрепетов Владимир Михайлович**, к.т.н., доцент;  
eLibrary SPIN: 4649-2141; ORCID: 0000-0002-4072-4519;  
E-mail: strepetov.vm@mail.ru

**Серета Геннадий Евгеньевич**, к.т.н., доцент;  
eLibrary SPIN: 9682-8744; ORCID: 0000-0003-0754-6682;  
E-mail: gennady.sereda@mail.ru

**Information about authors:**

**Konstantin E. Voevodskii**, Ph.D., assistant professor;  
eLibrary SPIN: 2579-7541; ORCID: 0000-0002-0519-5527;  
E-mail: kv5832@mail.ru

**Vladimir M. Strepetov**, Ph.D., assistant professor;  
eLibrary SPIN: 4649-2141; ORCID: 0000-0002-4072-4519;  
E-mail: strepetov.vm@mail.ru

**Gennadiy E. Sereda**, Ph.D., assistant professor;  
eLibrary SPIN: 9682-8744; ORCID: 0000-0003-0754-6682;  
E-mail: gennady.sereda@mail.ru

**Цитировать:**

Воеводский К.Э., Стрепетов В.М., Серета Г.Е. Левитационные характеристики транспортной установки с электродинамическим подвесом при наличие продольного стыка в путевом полотне // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т.5. – № 2. – С. 70–82. doi:10.17816/transsyst20195270-82

**To cite this article:**

Voevodskii KE, Strepetov VM, Sereda GE. Levitation characteristics of a transport installation with an electrodynamic suspension during a longitudinal joint with road track. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):70-82. doi: 10.17816/transsyst20195270-82

## Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление «Транспорт»

УДК [UDC] 656.34

DOI: 10.17816/transsyst20195283-91

© Е. Ю. Сундуков, Н. А. Тарабукина

Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук  
(Сыктывкар, Россия)

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХСТРОННЕЙ ЛЕВИТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ МОДУЛЕЙ ОТНОСИТЕЛЬНО АРЧНОЙ ЭСТАКАДЫ

**Обоснование:** Арочная эстакада позволяет использовать две рабочие поверхности: внутреннюю (под аркой) и внешнюю (над аркой), которые могут быть задействованы для перемещения транспортных модулей. Транспортные модули включают в себя источники магнитного поля, а эстакада оборудуется статорной обмоткой. Статорная обмотка подразделяется на ускоряющую (propulsion) обмотку и обмотку, обеспечивающую поднятие или подвешивание (levitation) транспортных модулей. Как вариант, обмотка, обеспечивающая левитацию, может быть заменена постоянными магнитами.

**Цель:** показать возможности арочной эстакады для перевозки пассажиров и грузов.

**Методы:** патентный поиск, моделирование.

**Результаты:** возможна одновременная перевозка грузов и пассажиров как в попутном, так и противоположном направлениях.

**Заключение:** повышается эффективность транспортной системы за счет двухстороннего перемещения модулей.

**Ключевые слова:** арочная эстакада, магнитная левитация, транспортный модуль, статорная обмотка, источники магнитного поля, грузовая кабина, пассажирская кабина.

## Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field “Transport”

© Evgeny Yu. Sundukov, Nadezhda A. Tarabukina

Komi Science Centre of Ural Division of the Russian Academy of Sciences  
(Syktyvkar, Russia)

### THE USE OF THE BILATERAL LEVITATION OF TRANSPORT MODULES RELATIVELY TO ARCH TRESTLE

**Background:** The arch trestle allows using two working surfaces: internal (under the arch) and external (over the arch) which may be used for moving of the transport pods. Transport pods include magnetic field sources, and the trestle is equipped with a stator winding. The stator winding is subdivided into the accelerating winding and suspension and

levitation winding. As an option, the winding providing levitation can be replaced with permanent magnets.

**Aim:** to show capacities of the arch trestle for transportation of passengers and goods.

**Methods:** patent search, modeling.

**Results:** simultaneous transportation of goods and passengers is possible both in the same and opposite directions.

**Conclusion:** the efficiency of the transport system increases due to bilateral movement of modules.

**Keywords:** arch trestle, magnetic levitation, transport pod, stator winding, magnetic field source, cargo cabin, passenger cabin.

## Введение

Транспортные системы эстакадного типа находят широкое применение при решении задач перевозки пассажиров и грузов. К ним можно отнести маглев [1], вакуумно-левитационные [2], монорельсовые [3], струнные и другие транспортные системы, а также комбинации конструктивных элементов таких систем.

Во многих случаях, когда в первую очередь требуется обеспечить доступность, а уже потом массовость, грузовых и пассажирских перевозок, например, в северных регионах РФ, экономичнее и надежнее могут оказаться малогабаритные транспортные системы эстакадного типа [4]. В частности, на полигоне компании SkyWay неподалеку от г. Минска проходит испытания линия струнного транспорта Юницкого (СТЮ) с новым элементом инфраструктуры – арочными опорами для жесткой путевой структуры [5]. В качестве подвижного состава будут использоваться навесные и подвесные пассажирские и грузовые модули. Разработчики СТЮ считают одним из наиболее важных аспектов функционирования системы контакт «стальное колесо – рельс».

В отличие от струнных технологий магнитолевитационные технологии позволяют обеспечить бесконтактное перемещение транспортных модулей (экипажей) относительно эстакады, что исключает любое трение. Преодолевать приходится только сопротивление воздушной среды при скоростях движения более 300 км/ч.

## Описание арочной эстакады и транспортных модулей

Наибольшее распространение получили магнитолевитационные системы Т-образной формы (германский вариант) и U-образной формы (японский вариант).

В данной статье рассматриваются варианты возможного развития малогабаритных магнитолевитационных систем с арочными опорами эстакады или эстакадой арочного типа  $\cap$ -образной формы [6]. Пролеты

путепровода в общем случае представляют собой жесткую конструкцию, оборудованную источниками магнитного поля, которые обеспечивают ускорение (propulsion) и поднятие и/или подвешивание (levitation) малогабаритных транспортных модулей [7].

Арочная эстакада позволяет использовать для перемещения транспортных модулей (ТМ) две рабочие поверхности: внутреннюю (под аркой) и внешнюю (над аркой). В зависимости от этого ТМ могут быть навесные (верхнее расположение) и подвесные (нижнее расположение).

Основными элементами ТМ являются кабина (грузовая или пассажирская) и мувер (один или несколько). Мувер представляет собой устройство, содержащее источник магнитного постоянного поля (ИМПП), для взаимодействия с источниками магнитного поля эстакады, обеспечивающими ускорение ТМ. Мувер и кабина могут быть соединены друг с другом непосредственно, либо с использованием механического соединения – тяги, либо каким другим способом.

Ускорение ТМ может задаваться посредством линейного электромагнитного двигателя, для чего эстакада оборудуется статорной обмоткой. Для задания лучшего магнитного усилия витки электромагнита могут устанавливаться наклоненными относительно направления движения ТМ [8].

Источники магнитного поля эстакады, обеспечивающие левитацию ТМ, могут быть как постоянными магнитами – ИМПП, так и электромагнитами. В последнем случае эстакада оборудуется дополнительной статорной обмоткой ограничителя перемещений [9].

### **Варианты использования «статор – мувер – кабина» и «статор – мувер – тяга – кабина»**

Рассматриваемые ниже варианты арочной эстакады разработаны авторами статьи, оформлены заявкой на выдачу патента РФ на изобретение № 2018144317 приоритет 14.12.2018 г., получено положительное решение формальной экспертизы.

На Рис. 1 показана одна из возможных конфигураций транспортной системы на основе арочной эстакады с двухсторонней левитацией ТМ при верхнем расположении грузового модуля (вариант «статор – мувер – кабина») и нижнем расположении пассажирского модуля (вариант «статор – мувер – тяга – кабина»), где:

- 1 – кабина грузового модуля;
- 2 – мувер грузового модуля;
- 3 – ИМПП грузового модуля, обеспечивающие левитацию;
- 4 – арочная опора;
- 5 – статорная обмотка для левитации грузового модуля;

- 6 – статорная обмотка электромагнита;  
 7 – пассажирский модуль;  
 8 – кабина пассажирского модуля;  
 9 – мувер пассажирского модуля;  
 10 – соединительная тяга;  
 11 – ИМПП эстакады для левитации пассажирского модуля;  
 12 – балочная конструкция для размещения мувера и ИМПП, обеспечивающих левитацию пассажирского модуля;  
 13 – опорная поверхность.

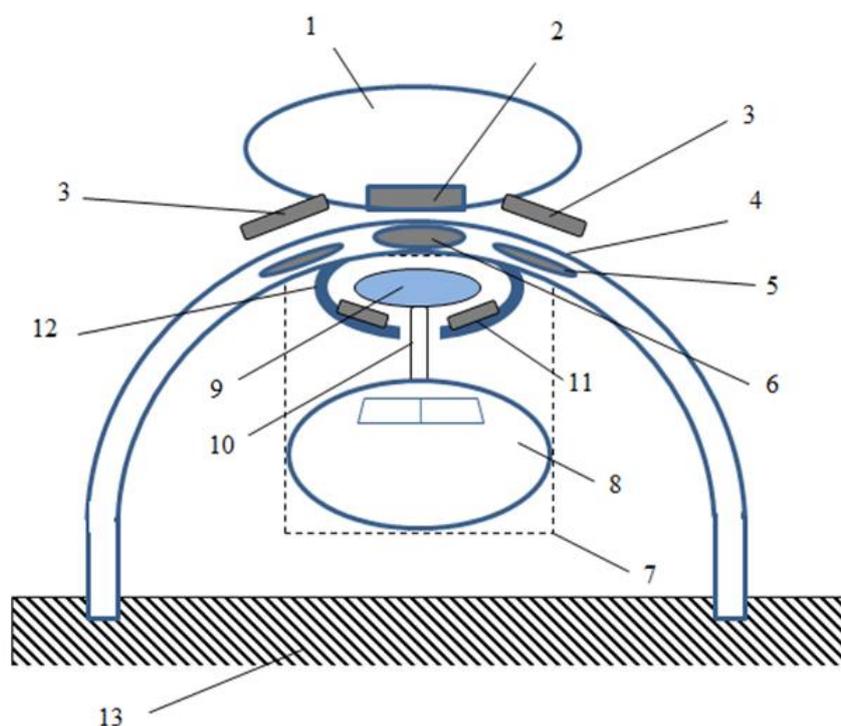


Рис. 1. Транспортная система на основе арочной эстакады с двухсторонней левитацией модулей: 1 – кабина грузового модуля; 2 – мувер грузового модуля; 3 – ИМПП грузового модуля, обеспечивающие левитацию; 4 – арочная опора; 5 – статорная обмотка для левитации грузового модуля; 6 – статорная обмотка электромагнита; 7 – пассажирский модуль; 8 – кабина пассажирского модуля; 9 – мувер пассажирского модуля; 10 – соединительная тяга; 11 – ИМПП эстакады для левитации пассажирского модуля; 12 – балочная конструкция для размещения мувера и ИМПП, обеспечивающих левитацию пассажирского модуля; 13 – опорная поверхность

В данной конфигурации мувер 2 грузового модуля непосредственно крепится к грузовой кабине 1, как и источники 3 магнитного постоянного поля, обеспечивающие левитацию ТМ. Статорная обмотка 5 для левитации ТМ располагается слева и справа от статорной обмотки электромагнита 6, которая имеет двойное назначение: одновременно задается ускорение и грузовому (верхнему), и пассажирскому (нижнему) ТМ.

Пассажирская кабина 8 и мувер 9 модуля 7 соединены посредством тяги 10. Мувер 9 используется как для левитации ТМ, для и для задания

ему ускорения. Левитация осуществляется при взаимодействии ИМПП мувера 9 с постоянными магнитами 11, расположенными по всей протяженности эстакады внутри балочной конструкции 12. Мувер 9 перемещается внутри конструкции 12, под действием сил ускорения, создаваемых при запитывании током определенных витков обмотки 6, соответственно, с ним перемещается весь транспортный модуль 7. При этом одновременно перемещается грузовой модуль с мувером 2. В зависимости от полярности ИМПП муверов 2 и 9 верхний и нижний ТМ будут перемещаться либо в попутном, либо в противоположных направлениях.

Магнитолевитационные системы на основе эстакады арочного типа способны обеспечить перевозки пассажиров и грузов в лесистых и заболоченных местностях, а также эффективное противостояние снежным заносам и другим атмосферным явлениям. Более защищенными в таких условиях окажутся системы с нижним расположением кабины (Рис. 2).

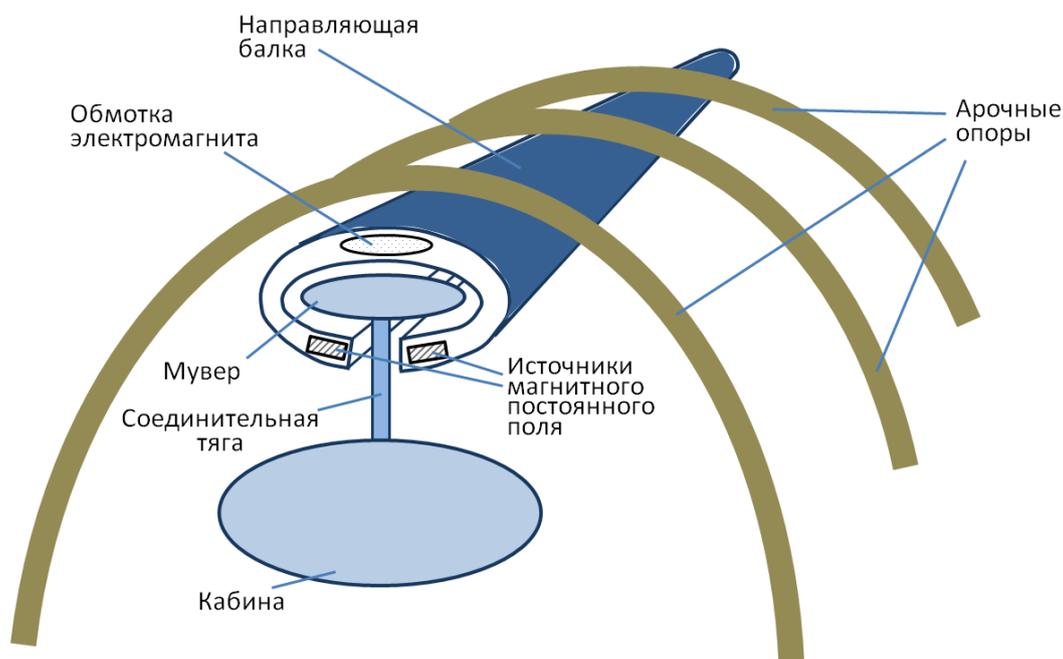


Рис. 2. Магнитолевитационная система на основе эстакады арочного типа с нижним расположением кабины

Опоры и направляющая балка эстакады могут изготавливаться из стеклопластика. Применение композитных материалов позволяет увеличить прочность и коррозионную стойкость сооружений [10, 11]. Вес стеклопластикового настила составляет всего около 20 % от веса аналогичного железобетонного покрытия.

Источниками магнитного постоянного поля могут быть мощные постоянные магниты на основе редкоземельных элементов [12, 13].

Как говорилось выше, мувер также содержит в себе ИМПП.

Желательно, чтобы магнитное поле ИМПП мувера было наведенным, а величина его магнитной индукции задавалась бы в зависимости от веса кабины и условий, в которых происходит движение. Эту функцию позволит обеспечить криостат в форме диска, внутри которого находится сверхпроводящий ИМПП.

Предполагается, что мувер будет интеллектуальным устройством и, помимо ИМПП, содержит вычислительное устройство, определяющее допустимые нагрузки, маршрут движения и др.

### Вариант использования «статор – мувер – тревеллер – кабина»

Следующим шагом в развитии подобных транспортных систем может быть бесконтактное соединение мувера и кабины, которое обеспечивается использованием эффекта «магнитной потенциальной ямы» [14], основанного на взаимодействии двух идеально проводящих колец. Одним из колец будет ИМПП мувера, а другим – ИМПП кабины (Рис. 3). Назовем его «тревеллер» (попутчик, fellow traveller). В этом случае направляющая балка будет неразрезной, что позволит создать благоприятные условия для движения мувера и стабилизации его положения. Тревеллер будет повторять движения мувера.

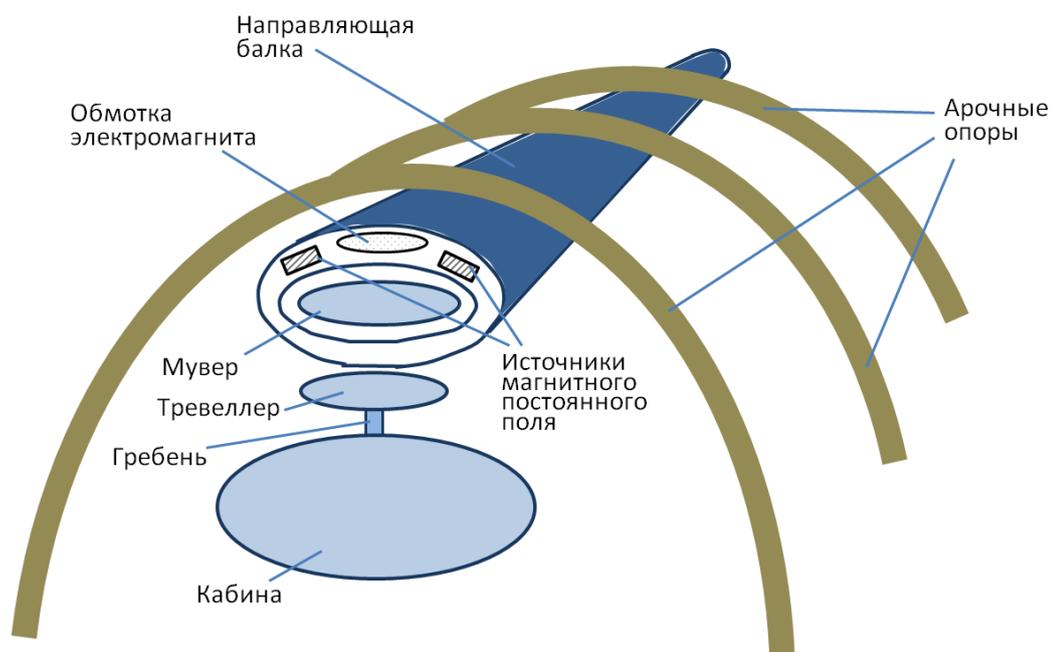


Рис. 3. Магнитолевитационная система на основе эстакады арочного типа с нижним расположением кабины и бесконтактным подсоединением мувера и тревеллера

В зависимости от веса и размеров кабины на ее гребне может быть установлено несколько тревеллеров, для каждого из которых в балку запускается «персональный» мувер.

Мувер, находящийся в сильно разреженной среде, может перемещаться с высокой скоростью. Однако, кабина при высоких скоростях движения будет преодолевать сильное сопротивление встречного воздуха и нагреваться. Поэтому согласованная скорость движения кабины и мувера не должна превышать критического значения – 300 км/ч.

На стадии создания системы [15] конструкция эстакады и ТМ может включать страховочные элементы, препятствующие возможным повреждениям, например, в случае потери сверхпроводимости ИМПП мувера. По мере совершенствования технологий данные элементы станут атавизмами.

В условиях Севера России можно рекомендовать использование арочных эстакад закрытого типа [7]. В районах, где нет сильной ветровой нагрузки и снежных заносов, вполне возможно использование вариантов арочной эстакады, предлагаемых авторами (см. Рис. 2, 3). При этом модули для перевозки пассажиров оборудуются гребнями, высота которых обеспечивает безопасное удаление от источников магнитного поля, находящихся в балочной конструкции [6].

### Выводы

Транспортные системы с двухсторонней левитацией модулей относительно арочной эстакады могут использоваться для перевозок пассажиров и грузов со скоростями до 300 км/ч, при этом:

- желательно использовать малогабаритные транспортные модули;
- либо пассивная статорная обмотка, либо постоянные магниты обеспечивают левитацию транспортных модулей;
- активная статорная обмотка взаимодействует с муверами транспортных модулей;
- для перемещения муверов создаются идеальные условия;
- тревеллеры, в случае их использования, повторяют движения муверов;
- при строительстве магнитолевитационных систем на основе арочной эстакады возможно использовать конструктивные решения других инновационных транспортных систем.

### Автор(ы) заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

**Библиографический список / References**

1. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23734009>. Ссылка активна на: 19.06.2019.
2. Лапидус Б.М. Магнитная левитация – фундаментальная основа для сверхскоростных вакуумно-левитационных транспортных технологий // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 3. – С. 26-35. [Lapidus BM. Magnetic Levitation as the Fundamental Basis for Superfast Vacuum Levitation Transport Technologies. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3):26-35. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst20184326-35.
3. Вершинина Н.В., Трапезников М.Б. Внедрение монорельса в транспортно-логистическую структуру региона // Транспорт Урала. – 2014. – № 1 (40). – С. 3–7. [Vershinina NV, Trapeznikov MB. Introduction of monorail in transport-logistical structure of the region. *Transport Urala*. 2014;1(40):3-7. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=33948556>. Ссылка активна на: 18.06.2019.
4. Назин Г.И., Новицкий В.Ф., Соколов В.Г., Шевченко Н.Г., Юницкий А.Э. Новые технологии в создании транспортных систем северных и восточных регионов России // Сибирская финансовая школа. – 2006. – № 4. – С. 1–9. [Nazin GI, Novitskii VF, Sokolov VG, Shevchenko NG, Yunitskii AE. Novye tekhnologii v sozdanii transportnykh sistem severnykh i vostochnykh regionov Rossii. *Sibirskaya finansovaya shkola*. 2006;(4):1-9. (In Russ.)]. Доступно по: <https://journal.safbd.ru/ru/content/novye-tehnologii-v-sozdanii-transportnyh-sistem-severnyh-i-vostochnykh-regionov-gossii>. Ссылка активна на: 19.06.2019.
5. Новая трасса достраивается в ЭкоТехноПарке. Сайт «Струнные технологии Юницкого». Доступно по: <http://yunitskiy.com/news/2019/news20190406.htm>. Ссылка активна на: 09.05.2019 (In Russ.).
6. Sundukov EYu, Selivanov LF, Sundukova VE. The Maglev-systems on the basis of Trestle of Arch Type. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3):72-79. doi: 10.17816/transsyst20184372-79.
7. Сундуков Е.Ю., Кочергин С.М., Селиванов Л.Ф. Арочная эстакада с магнитным или электромагнитным подвешиванием малогабаритных транспортных модулей // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 54–63. [Sundukov EYu, Kochergin SM., Selivanov LF. Application of Maglev Technologies In the European Northeast and the Cisural North of Russia. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(3):54-63. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20173354-63
8. Патент РФ на изобретение № 2123946/ 27.12.1996. Бюл. № 36. Сундуков Е.Ю. Транспортная система. Режим доступа: [https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet). Дата обращения: 29.05.2019. [Pat. RUS № 2123946/ 27.12.1996. Byul. № 36. Sundukov EYu. Transportnaya sistema. Available from: [https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet) (In Russ). Accessed May 29, 2019].
9. Sundukov E. The stator winding with the inclined rounds. Possible applications. In The International Maglev Board, editor. *Maglev Solutions for People, Cities, and Regions? MAGLEV 2016. Volume 1 of 2 – Technological Research and Development*; 2016. pp. 9-14. [cited 2019 May 29]. Available from: [https://www.maglevboard.net/images/maglev2016/MAGLEV\\_2016\\_Band\\_1\\_ksv.pdf](https://www.maglevboard.net/images/maglev2016/MAGLEV_2016_Band_1_ksv.pdf).

10. Первый в Европе композиционный мост из стеклопластика возведен в Германии. Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ. Доступно по: <http://fea.ru/news/4823>. Ссылка активна на: 09.05.2019. (In Russ.).
11. В Новосибирской области открылся первый мост из стеклопластика. Сетевое издание «НГС.НОВОСТИ». Доступно по: <https://news.ngs.ru/more/1865071/>. Ссылка активна на: 09.05.2019. (In Russ.).
12. Неодимовый магнит – самый мощный магнит в мире. Доступно по: <http://joy4mind.com/?p=8647#ixzz5knZ97R9A> Ссылка активна на: 09.05.2019. (In Russ.).
13. Магнитные рекорды. Доступно по: <https://habr.com/ru/post/405687/>. Ссылка активна на: 09.05.2019. (In Russ.).
14. Козорез В.В. Динамические системы магнитно-взаимодействующих свободных тел. – Киев: Наукова думка, 1981. – 140 с. [Kozorez VV. *Dinamicheskie sistemy magnitno-vzaimodeistviuyushchikh svobodnykh tel*. Kiev: Naukova dumka, 1981. 140 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.ikar.udm.ru/files/pdf/sb63-1.pdf>. Ссылка активна на: 19.06.2019.
15. Терешина Н.П., Подсорин В.А. Управление жизненным циклом технических систем на железнодорожном транспорте. – М.: Вега-Инфо, 2012. – 229 с. [Tereshina NP, Podsorin VA. *Upravlenie zhiznennym tsiklom tekhnicheskikh sistem na zheleznodorozhnom transporte*. Moscow: Vega-Info, 2012. 229 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21058875>. Ссылка активна на: 19.06.2019.

#### Сведения об авторах:

**Сундуков Евгений Юрьевич**, кандидат экономических наук, доцент;

адрес: 167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 26;

eLibrary SPIN: 8735-7995; ORCID: 0000-0003-0141-8292;

E-mail: jek-sun@mail.ru

**Тарабукина Надежда Андреевна**, ст. инженер;

eLibrary SPIN: 2559-9676;

E-mail: nadandtar@mail.ru

#### Information about the authors:

**Evgeny Sundukov**, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor;

address: Kommunisticheskaya ul., 26, Syktyvkar, Russia, 167982;

eLibrary SPIN: 8735-7995; ORCID: 0000-0003-0141-8292;

E-mail: jek-sun@mail.ru

**Nadezhda Tarabukina**, senior engineer;

eLibrary SPIN: 2559-9676;

E-mail: nadandtar@mail.ru

#### Цитировать:

Сундуков Е.Ю., Тарабукина Н.А. Использование двухсторонней левитации транспортных модулей относительно арочной эстакады // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 83–91. doi: 10.17816/transsyst20195283-91

#### To cite this article:

Sundukov EYu, Tarabukina NA. The Use of The Bilateral Levitation of Transport Modules Relatively Arch Trestle. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):83-91. doi: 10.17816/transsyst20195283-91

## Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление «Электротехника»

УДК [UDC] 629.439

DOI 10.17816/transsyst20195292-105

© В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе

Институт транспортных систем и технологий

Национальной академии наук Украины

(Днепр, Украина)

### РЕЗОНЫ И РАЦИОНАЛЬНАЯ МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

**Обоснование:** Синтез качественной динамики и её анализ – кардинальные задачи проблемы создания магнитолевитирующего поезда (МЛП).

**Цели работы:** Разработать парадигму и методику рационального решения указанных задач.

**Методы:** Синтез желаемого движения предлагается осуществлять путем решения обратной задачи динамики системы, а его прелиментарный анализ – решением прямой задачи той же динамики.

**Результаты:** Выявлены и обоснованы резоны моделирования динамики МЛП. Разработана парадигма и тензорная методика её компьютерного синтеза и анализа.

**Ключевые слова:** магнитолевитирующий поезд, динамика, анализ и синтез, компьютерное моделирование, тензорная методика.

## Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field “Electrical Engineering”

© Vladislav A. Polyakov, Nikolai M. Khachapuridze

Institute of Transport Systems and Technologies

of Ukraine’s National Academy of Sciences

(St. Dnepr, Ukraine)

### REASONS FOR AND RATIONAL METHODS OF MAGNETICALLY LEVITATED TRAINS DYNAMIC MODELLING

**Background:** The synthesis of high-quality dynamics and its analysis are the cardinal tasks of a magnetically levitated train’s (MLT) creating problem.

**Aims of the work:** Design the paradigm and technique of specified tasks’ rational solution.

**Methods:** The synthesis of the wanted motion is proposed to carry out by solving the system’s dynamic’s inverse problem, and its preliminary analysis – by solving the same dynamic’s direct problem.

**Results:** The reasons for MLT’s dynamic’s modeling are identified and substantiated.

The paradigm and tensor technique of its computer synthesis and analysis was developed.

**Keywords:** magnetically levitated train, dynamics, analysis and synthesis, computer modeling, tensor technique.

## ВВЕДЕНИЕ

Магнитолевитирующие поезда (МЛП) движутся со скоростями, намного более высокими, чем иные средства наземного транспорта. Безопасность такого движения должна быть гарантированно обеспечена во всех возможных эксплуатационных режимах и может быть индцирована критериями его качества. Это делает необходимым корректное и достаточно полное моделирование динамических процессов, протекающих в МЛП. Поэтому среди задач проблемы создания таких поездов диада синтеза их качественной динамики и её анализа является кардинальной.

Широкомасштабный натурный эксперимент с МЛП дорог, долог, опасен, а зачастую и вовсе невозможен. Традиционные аналитические методы исследования их динамики, как правило, также малоэффективны. Следовательно, возможно большая часть таких исследований должна выполняться путем компьютерного моделирования [1], сочетающего в себе, как известно, многие достоинства аналитических и экспериментальных методов. В то же время, достижение максимально возможной эффективности такого моделирования амбивалентно. Оно требует значительного повышения качества используемых математических моделей при наименьшей ресурсоемкости их получения и реализации. Традиционные способы решения задач динамики МЛП одновременно удовлетворить указанные антагонистические требования не позволяют.

## ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты анализа изложенных фактов выявляют потребность в разработке парадигмы и методики рационального решения задач синтеза и анализа динамики МЛП.

## РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ МЛП

Абсолютное большинство современных исследований динамики МЛП основано на решении ее прямой задачи [2–4], то есть – многократном интегрировании систем нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Их число обычно велико, а выражения элементов – громоздки и сложны. Решению упомянутой задачи должно предшествовать приведение уравнений модели к первому порядку, что сопряжено с обращением матриц

высокой размерности. Если учитывается параметрическая и/или структурная нестационарность системы, то такое обращение необходимо выполнять на каждом шаге интегрирования. Оперативный синтез движения поезда требует “бортовой”, прогнозирующей, многовариантной реализации его модели, выполнение которой описанным традиционным путем вовсе не реально. Но даже если модель предполагается использовать для поверочных расчётов в стационарных – не “бортовых” – условиях, а расчётная схема системы принята не слишком сложной, стационарной и голономной, интегрирование уравнений такой модели неоправданно ресурсоёмко. Причина этого – лавинообразный рост объёма и катастрофически быстрое падение точность требуемых информационных преобразований моделирования. Основной же неустранимый недостаток традиционного пути решения задач динамики МЛП состоит в том, что результат решения прямой задачи такой динамики носит предсказательно-констатирующий, когнитивный, не креативный характер и принципиально не может гарантировать достижение требуемого качества изучаемого движения.

Сдвиг парадигмы исследования динамики МЛП в сторону решения ее обратной задачи радикально меняет ситуацию. Реализация модели движения становится значительно менее ресурсоёмкой и вполне возможной непосредственно в процессе построения движения – на бортовых компьютерах. Осуществление результатов такой реализации позволяет гарантировать требуемое качество конструируемого движения и придать системе весьма важное свойство грубости [5]. Если, к тому же, управление поездом осуществляется по обобщённым ускорениям, то возникает дополнительная возможность автоматического обеспечения свойства адаптивности движения к обстановке [6]. Исследование, базирующееся на предлагаемой парадигме, обретает креативный, эвристический характер, не присущий традиционному пути его проведения. Это позволяет существенно облегчить процесс и усовершенствовать результат синтеза динамики рассматриваемой системы.

Исчерпывающий анализ результирующей динамики МЛП требует проведения экспериментов натуральных. Однако их объём должен быть сокращён до абсолютно неизбежного минимума. Все прелиминарные эксперименты должны быть компьютерными. Они вполне выполнимы в стационарных – не “бортовых” – условиях, в произвольном, удобном для исследования, масштабе времени и рационально реализуемы традиционным путем – решением прямой задачи динамики поезда.

### **МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ МЛП**

Базисом построения желаемой динамики поезда являются его естественные – под воздействием объективных возмущений – движения.

Они подлежат приоритетному моделированию. Основными критериями выбора его методики должны быть: полнота, синтетичность и удобство органичного учёта параметров, структуры системы, а также протекающих в ней процессов. Результаты анализа, исходящего из этих критериев, подобного рода альтернативных методик свидетельствуют о преимуществах тензорных методов по сравнению с классическими. Основными из этих преимуществ являются: инвариантность получаемых уравнений относительно преобразований координат; геометризация процессов анализа и синтеза движения; радикальное повышение компактности и обзримости выражений; рекуррентно-блочный характер процедуры моделирования с любой требуемой глубиной вложенности; возможность высокой формализации и автоматизации процесса исследования на базе систематического использования компьютерной техники. Изложенные факты выявляют целесообразность избрания тензорного типа методики для синтеза и анализа динамики МЛП.

При решении многих задач динамики МЛП в качестве расчётной схемы его механической подсистемы (МП) целесообразно принять агрегат абсолютно твёрдых – опорных – тел, соединённых с помощью связей через податливые блоки. Поэтому в качестве основы создаваемой методики примем дифференциальные уравнения пространственного движения такого тела в инерциальной системе координат  $OX_p \forall p \in [1, 3]$ . Последние уравнения известны [7], всегда неизменны и имеют вид

$$f_{ij\alpha\beta} \cdot \ddot{\varepsilon}_{ij}^\beta + E_{ij\alpha,\beta\gamma} \cdot \dot{\varepsilon}_{ij}^\beta \cdot \dot{\varepsilon}_{ij}^\gamma = K_{ij\alpha} \quad \forall \alpha, \beta, \gamma \in [1, 6], \quad (1)$$

где  $f_{ij\alpha\beta}, E_{ij\alpha,\beta\gamma} \forall \alpha, \beta, \gamma \in [1, 6]$  – ковариантный метрический тензор  $j$ -го опорного тела расчётной схемы  $i$ -го экипажа МЛП, а также трёхиндексный символ Кристоффеля 1-го рода того же тела в координатах  $\varepsilon_{ij}^\beta \forall \beta \in [1, 6]$ ;

$\varepsilon_{ij}^\beta, K_{ij\alpha} \forall \alpha, \beta \in [1, 6]$  – опорные координаты того же тела относительно триэдра  $OX_p \forall p \in [1, 3]$ , а также соответствующие им обобщённые силы.

Принимая, например

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^1 &= x_{ijC1}; & \varepsilon_{ij}^2 &= x_{ijC2}; & \varepsilon_{ij}^3 &= x_{ijC3}; \\ \varepsilon_{ij}^4 &= \lambda_{ij}^1 = \tilde{\Psi}_{ij}; & \varepsilon_{ij}^5 &= \lambda_{ij}^2 = \tilde{\Theta}_{ij}; & \varepsilon_{ij}^6 &= \lambda_{ij}^3 = \tilde{\Upsilon}_{ij}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x_{ijCp} \forall p \in [1, 3]$  – декартовы координаты точки  $ijC$  – центра масс рассматриваемого тела – в триэдре  $OX_p \forall p \in [1, 3]$ ;

$\tilde{\Psi}_{ij}, \tilde{\Theta}_{ij}, \tilde{\Upsilon}_{ij}$  – эйлеровы углы, определяющие взаимную ориентацию связанного с телом  $ijC_r \forall r \in [1, 3]$  и того же инерциального  $OX_p \forall p \in [1, 3]$  триэдров, можно показать, что

$$\begin{aligned}
f_{ij\alpha\beta} &= \begin{bmatrix} f_{ijt} & 0 \\ 0 & f_{ijr} \end{bmatrix} \forall \alpha, \beta \in \overline{[1, 6]}; \\
f_{ijt} &= \text{diag} \{m_{ij}, m_{ij}, m_{ij}\}; \\
f_{ijr} &= \begin{bmatrix} f_{ij44} & f_{ij45} & f_{ij46} \\ f_{ij54} & f_{ij55} & 0 \\ f_{ij64} & 0 & f_{ij66} \end{bmatrix}; \\
f_{ij44} &= (I_{ij11} \cdot \cos^{(2)} \tilde{\gamma}_{ij} + I_{ij22} \cdot \sin^{(2)} \tilde{\gamma}_{ij}) \cdot \cos^{(2)} \tilde{\theta}_{ij} + I_{ij33} \cdot \sin^{(2)} \tilde{\theta}_{ij}; \\
f_{ij45} &= f_{ij54} = (I_{ij11} - I_{ij22}) \cdot \cos \tilde{\theta}_{ij} \cdot \sin \tilde{\gamma}_{ij} \cdot \cos \tilde{\gamma}_{ij}; \\
f_{ij46} &= f_{ij64} = I_{ij33} \cdot \sin \tilde{\theta}_{ij}; \\
f_{ij55} &= I_{ij11} \cdot \sin^{(2)} \tilde{\gamma}_{ij} + I_{ij22} \cdot \cos^{(2)} \tilde{\gamma}_{ij}; \quad f_{ij66} = I_{ij33}, \quad (3)
\end{aligned}$$

где  $m_{ij}, I_{ijpp} \forall p \in \overline{[1, 3]}$  – масса того же опорного тела, а также его главные центральные (относительно осей триэдра  $ijCz_r \forall r \in \overline{[1, 3]}$ ) моменты инерции.

Экипажи МЛП являются путенаправляемыми. Поэтому, как правило, его динамику удобно рассматривать относительно пути, по которому он движется. Такой подход облегчает интерпретацию результатов исследований и повышает их информативность. В то же время, координатные триэдры, сопровождающие экипажи в движении и отслеживающие поверхность пути, являются неинерциальными: их начала имеют отличные от нуля абсолютные ускорения, а сами они вращаются. Итак, для МЛП, движущегося по пространственному перелому пути, возникает задача динамики относительного движения.

Уравнения (1) – тензорные. Поэтому они форминвариантны по отношению к преобразованиям координат, в которых записаны. В координатах  $\rho_{ij}^k \forall k \in \overline{[1, 6]}$ , определяющих положение того же опорного тела относительно неинерциального триэдра  $iQY_q \forall q \in \overline{[1, 3]}$ , сопровождающего  $i$ -ый экипаж в его движении относительно поверхности пути под ним, движение тела может быть описано моделью, получаемой из (1) подстановкой

$$\varepsilon_{ij}^\beta = \frac{\partial \varepsilon_{ij}^\beta}{\partial \rho_{ij}^k} \cdot \rho_{ij}^k \quad \forall \beta, k \in \overline{[1, 6]} \quad (4)$$

и умножением получающихся выражений на матрицу преобразования

$$\tau_{ijk}^\beta = \frac{\partial \varepsilon_{ij}^\beta}{\partial \rho_{ij}^k} \quad \forall \beta, k \in \overline{[1, 6]}. \quad (5)$$

Аналогично (2), положение тела в триэдре  $iQY_q \forall q \in \overline{[1, 3]}$  может быть определено, например, координатами

$$\begin{aligned} \rho_{ij}^1 &= y_{ijC1}; \quad \rho_{ij}^2 = y_{ijC2}; \quad \rho_{ij}^3 = y_{ijC3}; \\ \rho_{ij}^4 &= v_{ij}^1 = \psi_{ij}; \quad \rho_{ij}^5 = v_{ij}^2 = \theta_{ij}; \quad \rho_{ij}^6 = v_{ij}^3 = \gamma_{ij}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $y_{ijC\xi}, v_{ij}^\xi \forall \xi \in [1, 3]$  – декартовы координаты точки  $ijC$  в триэдре  $iQY_q \forall q \in [1, 3]$ , а также эйлеровы углы, определяющие ориентацию относительно него триэдра  $ijCz_r \forall r \in [1, 3]$ .

Тогда из (2), (5) и (6) следует, что

$$\begin{aligned} \tau_{ijk}^\beta &= \begin{bmatrix} \zeta_{ijpq} & 0 \\ 0 & \sigma_{ijv}^u \end{bmatrix}; \quad \zeta_{ijpq} = \frac{\partial x_{ijCp}}{\partial y_{ijCq}}; \quad \sigma_{ijv}^u = \frac{\partial \lambda_{ij}^u}{\partial v_{ij}^v}; \\ &\forall \beta, \kappa \in [1, 6]; \quad p, q, v \in [1, 3]. \end{aligned} \quad (7)$$

В то же время, из кинематических соотношений заключаем, что

$$\lambda_{ij}^u = \lambda_{ij}^u(v_{ij}^v, \chi_i^w) \quad \forall u, v, w \in [1, 3], \quad (8)$$

где  $\chi_i^w \forall w \in [1, 3]$  – эйлеровы углы, определяющие взаимную ориентацию триэдров  $iQY_q \forall q \in [1, 3]$  и  $OX_p \forall p \in [1, 3]$ .

Можно принять, например, что

$$\chi_i^1 = \psi_i^*; \quad \chi_i^2 = \theta_i^*; \quad \chi_i^3 = \gamma_i^*, \quad (9)$$

где  $\psi_i^*, \theta_i^*, \gamma_i^*$  – углы, определяющие конфигурацию пути под  $i$ -ым экипажем МЛП.

Считая путь склерономным, получаем

$$\chi_i^\vartheta = \chi_i^\vartheta(w_{iQ}) \quad \forall \vartheta \in [1, 3], \quad (10)$$

где  $w_{iQ}$  – расстояние, пройденное точкой  $iQ$  вдоль оси пути за интервал наблюдения движения поезда.

Из (4) следует, что

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^\beta = \frac{\partial \varepsilon_{ij}^\beta}{\partial \rho_{ij}^\kappa} \cdot \dot{\rho}_{ij}^\kappa = \tau_{ijk}^\beta \cdot \dot{\rho}_{ij}^\kappa \quad \beta, \kappa \in [1, 6]. \quad (11)$$

Тогда

$$\ddot{\varepsilon}_{ij}^\beta = \ddot{\rho}_{ij}^\kappa \cdot \tau_{ijk}^\beta + \dot{\rho}_{ij}^\kappa \cdot \dot{\tau}_{ijk}^\beta \quad \forall \beta, \kappa \in [1, 6]. \quad (12)$$

В последних выражениях, исходя из (5),

$$\dot{\tau}_{ijk}^\beta = \frac{d}{dt} \frac{\partial \varepsilon_{ij}^\beta}{\partial \rho_{ij}^\kappa} = \dot{\rho}_{ij}^n \cdot \frac{\partial^{(2)} \varepsilon_{ij}^\beta}{\partial \rho_{ij}^\kappa \partial \rho_{ij}^n} = \dot{\rho}_{ij}^n \cdot \frac{\partial}{\partial \rho_{ij}^n} \tau_{ijk}^\beta \quad \forall \beta, \kappa, n \in [1, 6]. \quad (13)$$

После подстановки выражений (11)–(13) в модель (1), она приобретает вид

$$f_{ij\alpha\beta} \cdot (\ddot{\rho}_{ij}^{\kappa} \cdot \tau_{ij\kappa}^{\beta} + \dot{\rho}_{ij}^{\kappa} \cdot \dot{\rho}_{ij}^n \cdot \frac{\partial}{\partial \rho_{ij}^n} \tau_{ij\kappa}^{\beta}) + E_{ij\alpha,\beta\gamma} \cdot \tau_{ij\kappa}^{\beta} \cdot \dot{\rho}_{ij}^{\kappa} \cdot \tau_{ijn}^{\gamma} \cdot \dot{\rho}_{ij}^n = K_{ij\alpha}$$

$$\forall \alpha, \beta, \gamma, \kappa, n \in \overline{[1, 6]}.$$
 (14)

Умножая эти уравнения на  $\tau_{ijp}^{\alpha}$ , со свёрткой по  $\alpha$ , модель движения опорного тела относительно триэдра  $iQY_q \forall q \in \overline{[1, 3]}$  получаем в виде

$$g_{ijp\kappa} \cdot \ddot{\rho}_{ij}^{\kappa} + \Gamma_{ijp,\kappa n} \cdot \dot{\rho}_{ij}^{\kappa} \cdot \dot{\rho}_{ij}^n = T_{ijp} \quad \forall p, \kappa, n \in \overline{[1, 6]};$$
 (15)

$$g_{ijp\kappa} = f_{ij\alpha\beta} \cdot \tau_{ijp}^{\alpha} \cdot \tau_{ij\kappa}^{\beta};$$

$$\Gamma_{ijp,\kappa n} = f_{ij\alpha\beta} \cdot \tau_{ijp}^{\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial \rho_{ij}^n} \tau_{ij\kappa}^{\beta} + E_{ij\alpha,\beta\gamma} \cdot \tau_{ijp}^{\alpha} \cdot \tau_{ij\kappa}^{\beta} \cdot \tau_{ijn}^{\gamma};$$

$$T_{ijp} = K_{ij\alpha} \cdot \tau_{ijp}^{\alpha} \quad \forall \alpha, \beta, \gamma, p, \kappa, n \in \overline{[1, 6]},$$
 (16)

где  $g_{ijp\kappa}, \Gamma_{ijp,\kappa n}, T_{ijp} \forall p, \kappa, n \in \overline{[1, 6]}$  – ковариантный метрический тензор рассматриваемого тела, его трёхиндексный символ Кристоффеля 1-го рода в координатах  $\rho_{ij}^{\kappa} \forall \kappa \in \overline{[1, 6]}$ , а также соответствующие этим координатам обобщённые силы.

В модели (15), (16), как известно [7],

$$\Gamma_{ijp,\kappa n} = 0,5 \cdot \left( \frac{\partial g_{ijp\kappa}}{\partial \rho_{ij}^n} + \frac{\partial g_{ijpn}}{\partial \rho_{ij}^{\kappa}} - \frac{\partial g_{ij\kappa n}}{\partial \rho_{ij}^p} \right) \quad \forall p, \kappa, n \in \overline{[1, 6]}.$$
 (17)

Итак, модель (15)–(17) описывает относительное движение свободного опорного тела расчётной схемы МЛП в неинерциальном триэдре  $iQY_q \forall q \in \overline{[1, 3]}$ .

До объединения в агрегат, являющийся расчётной схемой поезда, входящие в неё тела ничем не соединены, их движения ничем не стеснены и конфигурация этой совокупности в триэдрах  $iQY_q \forall i \in \overline{[1, N]}, q \in \overline{[1, 3]}$  может быть определена опорными координатами

$$\xi^{\beta} \quad \forall \beta \in \overline{[1, 6 \cdot N \cdot N]},$$
 (18)

где  $N, N$  – число опорных тел в расчётной схеме экипажа, а также таких экипажей в поезде.

После сопряжения в агрегат, на движения тел расчётной схемы МЛП накладываются ограничения, формализуемые уравнениями связей, которые будем считать склерономными голономными

$$\xi^{\beta} = \xi^{\beta}(\eta^{\lambda}) \quad \forall \beta \in \overline{[1, 6 \cdot N \cdot N]}, \lambda \in \overline{[1, L]},$$
 (19)

где  $\eta^\lambda \forall \lambda \in [1, \overline{L}]$ ,  $L$  – обобщённые координаты, принятые для описания движения рассматриваемой системы и их число.

Таким образом, способ сопряжения тел в агрегат, являющийся расчётной схемой МЛП, может быть описан структурной матрицей [8] этого агрегата

$$s = \frac{\partial \xi^\beta}{\partial \eta^\lambda} \forall \beta \in [1, \overline{6 \cdot N}], \lambda \in [1, \overline{L}]. \quad (20)$$

Пользуясь координатами (18), движение совокупности тел, входящих в расчётную схему МЛП, может быть описано моделью, являющейся совокупностью уравнений вида (15)

$$b_{\alpha\beta} \cdot \ddot{\xi}^\beta + B_{\alpha,\beta\gamma} \cdot \dot{\xi}^\beta \cdot \dot{\xi}^\gamma = U_\alpha \forall \alpha, \beta, \gamma \in [1, \overline{6 \cdot N}]; \quad (21)$$

$$b_{\alpha\beta} = \text{diag}\{[g_{ijpk}]\}; \quad B_{\alpha,\beta\gamma} = \text{diag}\{[\Gamma_{ijp, kn}]\}; \quad U_\alpha = [\Gamma_{ijp}]^r \\ \forall \alpha, \beta, \gamma \in [1, \overline{6 \cdot N}]; i \in [1, \overline{N}]; j \in [1, \overline{N}]; p, k, n \in [1, \overline{6}], \quad (22)$$

где  $b_{\alpha\beta}, B_{\alpha,\beta\gamma} \forall \alpha, \beta, \gamma \in [1, \overline{6 \cdot N}]$  – ковариантный метрический тензор совокупности и её трёхиндексный символ Кристоффеля 1-го рода в координатах  $\xi^\beta \forall \beta \in [1, \overline{6 \cdot N}]$ ;

$U_\alpha \forall \alpha \in [1, \overline{6 \cdot N}]$  – соответствующие им обобщённые силы.

Уравнения (21), как и их составляющие – уравнения (15), являются тензорными. Поэтому они форминвариантны относительно преобразований координат, в которых записаны. То есть, могут быть (без изменения формы) преобразованы к записи в координатах  $\eta^\lambda \forall \lambda \in [1, \overline{L}]$ . Для этого (аналогично преобразованию уравнений (1) в модель (15)) воспользуемся структурной матрицей (20) расчётной схемы МЛП, а также выражениями

$$\dot{\xi}^\beta = \frac{\partial \xi^\beta}{\partial \eta^\lambda} \cdot \dot{\eta}^\lambda \forall \beta \in [1, \overline{6 \cdot N}]; \lambda \in [1, \overline{L}]; \quad (23)$$

$$\ddot{\xi}^\beta = \frac{\partial \xi^\beta}{\partial \eta^\lambda} \cdot \ddot{\eta}^\lambda + \frac{\partial^2 \xi^\beta}{\partial \eta^\lambda \partial \eta^\mu} \cdot \dot{\eta}^\lambda \cdot \dot{\eta}^\mu \forall \beta \in [1, \overline{6 \cdot N}]; \lambda, \mu \in [1, \overline{L}], \quad (24)$$

непосредственно следующих из уравнений (19) связей, наложенных на тела этой схемы. После умножения уравнений (21) на матрицу (20) (со свёрткой по “немым” индексам), а также подстановки в них соотношений (23) и (24), модель движения МЛП в координатах  $\eta^\lambda \forall \lambda \in [1, \overline{L}]$ , то есть относительно неинерциальных триэдров  $iQY_q \forall i \in [1, \overline{N}], q \in [1, \overline{3}]$ , получаем в виде

$$c_{\lambda\mu} \cdot \ddot{\eta}^\mu + C_{\lambda,\mu\nu} \cdot \dot{\eta}^\mu \cdot \dot{\eta}^\nu = Y_\lambda \forall \lambda, \mu, \nu \in [1, \overline{L}]; \quad (25)$$

$$c_{\lambda\mu} = b_{\alpha\beta} \cdot \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial \eta^\lambda} \cdot \frac{\partial \xi^\beta}{\partial \eta^\mu} \quad \forall \alpha, \beta \in \overline{[1, 6 \cdot H \cdot N]}; \lambda, \mu \in \overline{[1, L]}; \quad (26)$$

$$C_{\lambda,\mu\nu} = b_{\alpha\beta} \cdot \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial \eta^\lambda} \cdot \frac{\partial^2 \xi^\beta}{\partial \eta^\lambda \partial \eta^\nu} + \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial \eta^\lambda} \cdot \frac{\partial \xi^\beta}{\partial \eta^\mu} \cdot \frac{\partial \xi^\gamma}{\partial \eta^\nu} \cdot B_{\alpha,\beta\gamma} \\ \forall \alpha, \beta, \gamma \in \overline{[1, 6 \cdot H \cdot N]}; \lambda, \mu, \nu \in \overline{[1, L]}; \quad (27)$$

$$Y_\lambda = \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial \eta^\lambda} \cdot U_\alpha \quad \forall \alpha, \beta, \gamma \in \overline{[1, 6 \cdot H \cdot N]}; \lambda \in \overline{[1, L]}, \quad (28)$$

где  $c_{\lambda\mu}, C_{\lambda,\mu\nu}, Y_\lambda \quad \forall \lambda, \mu, \nu \in \overline{[1, L]}$  – ковариантный метрический тензор расчётной схемой поезда, её трёхиндексный символ Кристоффеля 1-го рода в координатах  $\eta^\lambda \quad \forall \lambda \in \overline{[1, L]}$ , а также соответствующие обобщённые силы.

Аналогично (17),

$$C_{\lambda,\mu\nu} = 0,5 \cdot \left( \frac{\partial c_{\lambda\mu}}{\partial \eta^\nu} + \frac{\partial c_{\lambda\nu}}{\partial \eta^\mu} - \frac{\partial c_{\mu\nu}}{\partial \eta^\lambda} \right) \quad \forall \lambda, \mu, \nu \in \overline{[1, L]}. \quad (29)$$

Построение модели (25), (26), (28), (29) требует использования лишь операций матричной алгебры. Они реализовались программно с использованием символьного компонента системы компьютерной математики Mathematica. Поэтому такое построение происходит в полностью автоматическом режиме, имея своим итоговым результатом явные выражения всех элементов указанной модели (которые не приводятся ввиду громоздкости). При этом, благодаря синтетичности учёта функционально-структурной организации МЛП, в полученных уравнениях модели его относительного движения автоматически учтены все члены, отражающие истинное динамическое силовое равновесие в системе. Рассмотрение псевдосил инерции, как это предполагается, например, при использовании методики уравнений Лагранжа [9–11], при этом не требуются. Уравнения модели, получаемой с использованием предлагаемой методики, снова являются тензорными. Поэтому, при возникновении такой надобности, они, без фундаментальной перестройки, преобразуемы (согласно изложенному алгоритму) не только к любой иной удобной для какого-либо исследования системе обобщённых координат, но и к иной структуре расчётной схемы исследуемого объекта.

### МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОЙ ДИНАМИКИ МЛП

Динамика поезда, определяемая его естественными возмущениями и описываемая моделью (25), в подавляющем большинстве случаев не обладает желательными свойствами. В свою очередь, эти свойства

определяют качество движения и могут быть представлены его задачами, а затем – в виде программ – целями, благодаря чему, – становятся доступными для использования. Чтобы МЛП совершал желаемое движение, описывающая модель должна не противоречить объективным законам механики и, в то же время, должна быть совместна с программами динамики управляемой [5]. Одновременное соблюдение обоих этих условий достижимо любым изменением модели естественной динамики, которое делает её совместной с такими программами. Способ преобразования модели принципиально не ограничен и определяется, в основном, удобством натурной реализации влекомых им изменений исследуемой системы или/и воздействий на неё. На практике наиболее распространённым является введение в модель движения аддитивных управляющих воздействий на систему [12].

С целью конкретизации рассмотрения, примем один из наиболее гибких и приемлемых для МЛП способ натурной реализации его желаемого движения – терминальное управление им [13, 14]. Тогда задачей движения поезда считается его приведение, по достижении принятой независимой переменной заданных значений, в априорно заданную последовательность состояний. А на пространства фазовых координат, естественных возмущений и управлений накладываются реальные ограничения  $\Omega_x(t)$ ,  $\Omega_w(t)$  и  $\Omega_u(t)$  соответственно. В зависимости от целей и задач исследования, эти множества могут быть различно физически интерпретированы.

Исходя из модели (25) естественной динамики МП МЛП, в случае терминального управления им, модель управляемого движения этой подсистемы имеет вид

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), w(t), t] \quad \forall t \in [t_s, \theta]; \quad x(t_s) = x_s, \quad (30)$$

где  $x(t), u(t), w(t) \forall t \in [t_s, \theta]$  – векторы состояния подсистемы, а также управляющих и возмущающих воздействий на неё;

$t$  – удобная для проведения исследования независимая переменная, например, время;

$[t_s, \theta]$  – интервал построения движения;

$x_s$  – его начальные условия.

Цель движения поезда формализуем программой

$$x(\tau) = x_f, \quad (31)$$

где  $\tau, x_f$  – значения независимой переменной и вектора состояния МП МЛП в конечный, на рассматриваемом терминальном интервале управления, момент.

При этом, исходя из физического смысла процесса движения, должны соблюдаться соотношения

$$x(t) \in \Omega_x(t), u(t) \in \Omega_u(t) \quad \forall t \in [t_s, \tau] \quad (32)$$

и, кроме того, быть известна некоторая априорная информация

$$w(t) \in \Omega_w(t) \quad \forall t \in [t_s, \tau]. \quad (33)$$

Программа (31) накладывает ограничение лишь на конечное (на интервале  $[t_s, \tau]$ ) состояние МП поезда. Поэтому моделью (30), совместно с условиями (31)–(33), определяется ансамбль фазовых траекторий изображающей точки подсистемы в пространстве её состояний

$$\begin{aligned} X[u(\bullet), w(\bullet), x_s, x_f] &= \{x[\bullet, u(\bullet), w(\bullet), x_s, x_f] \in \Omega_x(t) : \\ &u(\bullet) \in \Omega_u(t), w(\bullet) \in \Omega_w(t), t \in [t_s, \tau]\}; \\ u(\bullet) &= \{u(t) \quad \forall t \in [t_s, \tau]\}; w(\bullet) = \{w(t) \quad \forall t \in [t_s, \tau]\}; \\ \{x[\bullet, u(\bullet), w(\bullet), x_s, x_f]\} &= \{x[t, u(\bullet), w(\bullet), x_s, x_f] \quad \forall t \in [t_s, \tau]\}, \end{aligned} \quad (34)$$

каждая из которых удовлетворяет краевым условиям

$$x(t_s) = x_s, \quad x(\tau) = x_f. \quad (35)$$

Если, помимо удовлетворения этих условий, к движению МП МЛП не предъявляется никаких иных требований, то оно синтезируется в чисто терминальной постановке, предполагающей, в зависимости от конкретных значений возмущений (33), возможность реализации любой траектории из ансамбля (34). Таким образом, в данном случае движение определено лишь с точностью до этого возможного ансамбля.

Из изложенного следует, что, при чисто терминальной постановке задачи построения движения МП поезда, относительно его конкретной реализации имеется существенный конструктивный произвол. Он может быть использован для придания этому движению дополнительных полезных свойств. Например, если потребовать, чтобы, помимо удовлетворения условий (32) и (35), на реализуемой фазовой траектории подсистемы имело место соотношение

$$\begin{aligned} I &= \inf_{u(\bullet)} \sup_{w(\bullet)} \left\{ \int_{t_s}^{\tau} \lambda[u(\bullet), w(\bullet)] \cdot dt : \right. \\ &u(\bullet) \in \Omega_u(t), w(\bullet) \in \Omega_w(t), t \in [t_s, \tau] \}, \end{aligned} \quad (36)$$

где  $I$  – интегральный показатель качества движения;

$\lambda$  – заданная функция своих аргументов,

то задача синтеза движения носит игровой минимаксный характер, базирующийся на концепции гарантированного результата [15]. При этом упомянутое движение приобретает свойства, оптимальные по критерию  $I$ ,

а из ансамбля (34) реализуется единственная траектория, экстремальная по этому критерию. Движение МП МЛП определено однозначно и гарантированно обладает оптимальностью в желаемом смысле при любых возможных возмущениях. Такой подход позволяет, в зависимости от необходимости, в различных эксплуатационных режимах оптимизировать требуемые характеристики указанного движения.

Итак, путем классификации и параметризации обстановки, в которой происходит движение МП МЛП [15], а также построения для каждой типовой ситуации оптимального, в желаемом смысле, управления этим движением, может быть решена задача его терминального синтеза [13], то есть – обратная задача динамики поезда в терминальной постановке. На практике при разработке конструктивных систем такого синтеза неизбежно возникает проблема необходимости одновременного удовлетворения совокупности разнородных, зачастую – антагонистичных, требований, предъявляемых к качеству синтезируемого движения. Рациональный способ его оптимизации, в этом случае, состоит во введении векторного критерия  $I$ , элементы которого – частные критерии, индицирующие оптимизируемые парциальные свойства такого движения [16, 17].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования динамики МЛП, проводимые в рамках разработанной парадигмы и основанной на ней методики, комплексно компьютеризированы на базе современных систем компьютерной математики [18–20]. Эти исследования значительно более эвристичны и ресурсно-экономичны по сравнению с проводимыми традиционными методами. Результаты, получаемые предлагаемым путем, креативны. Их использование позволяет гарантировать требуемое качество движения поезда, а также придать ему весьма важное свойство грубости. При этом если управление синтезируемым движением замыкается по обобщённым ускорениям системы, то это движение обретает свойство адаптивности к обстановке. Изложенные факты выявляют целесообразность использования предлагаемых парадигмы и методики при исследованиях динамики МЛП. Это позволит существенно облегчать процесс и усовершенствовать результат таких исследований.

### Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей или животных в качестве объектов исследований.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Дзензерский В.А., Омеляненко В.И., Васильев С.В. и др. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / под ред. В.А. Дзензерского, В.И. Омеляненко. – Киев: Нукова думка, 2001. – 479 с. [Dzenzerskii VA, Omel'yanenko VI, Vasil'ev SV, et al. *Vysokoskorostnoi magnitnyi transport s elektrodinamicheskoi levitatsiei*. Dzenzerskii VA, Omel'yanenko VI, editors. Kiev: Nukova dumka, 2001. 479 p. (In Russ.)].
2. Манашкин А.Л., Хачапуридзе Н.М. Математическое моделирование движения магнитолевитирующего экипажа с линейным синхронным двигателем и оценка уровня комфорта пассажиров // Физико-технические и технологические приложения математического моделирования: сб. научных трудов. – Киев, 1998. – С. 161–164. [Manashkin AL, Khachapuridze NM. *Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya magnitolevitiruyushchego ekipazha s lineinym sinkhronnym dvigatelem i otsenka urovnya komforta passazhirov*. *Fiziko-tekhnicheskie i tekhnologicheskie prilozheniya matematicheskogo modelirovaniya: sb. nauchnykh trudov*. Kiev. 1998:161-164. (In Russ.)].
3. Дзензерский В.А., Зевин А.А., Радченко Н.А. и др. Некоторые вопросы математического моделирования левитационного движения электродинамических транспортных средств // Математическое моделирование в образовании, науке и промышленности: сб. научных трудов. – СПб: Санкт-Петербургское отделение МАН ВШ, 2000. – С. 65–66. [Dzenzerskii VA, Zevin AA, Radchenko NA, et al. *Nekotorye voprosy matematicheskogo modelirovaniya levitatsionnogo dvizheniya elektrodinamicheskikh transportnykh sredstv*. *Matematicheskoe modelirovanie v obrazovanii, nauke i promyshlennosti: sb. nauchnykh trudov*. St. Petersburg. 2000:65-66. (In Russ.)].
4. Дзензерский В.А., Радченко Н.А. Динамика транспорта на сверхпроводящих магнитах. – Днепропетровск, 2003. – 232 с. [Dzenzerskii VA, Radchenko NA *Dinamika transporta na sverkhprovodyashchikh magnitakh*. Dnepropetrovsk; 2003. 232 p. (In Russ.)].
5. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели: монография. – М.: Наука, 1988. – 328 с. [Krut'ko PD. *Obratnye zadachi dinamiki upravlyaemykh sistem. Nelineinye modeli: monografiya*. Moscow: Nauka; 1988. 328 p. (In Russ.)].
6. Справочник по автоматическому управлению / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с. [Krasovskii AA, editor. *Spravochnik po avtomaticheskomu upravleniyu*. Moscow: Nauka; 1987. 712 p. (In Russ.)].
7. Лурье А.И. Аналитическая механика. – М.: Гостехиздат, 1961. – 824 с. [Lur'e AI. *Analiticheskaya mekhanika*. Moscow: Gostekhizdat; 1961. 824 p. (In Russ.)].
8. Шатихин Л.Г. Структурные матрицы и их применение для исследования систем. – М.: Машиностроение, 1991. – 256 с. [Shatikhin LG. *Strukturnye matritsy i ikh primenenie dlya issledovaniya sistem*. Moscow: Mashinostroenie; 1991. 256 p. (In Russ.)].
9. Ишлинский А.Ю. Классическая механика и силы инерции. – М.: Наука, 1987. – 320 с. [Ishlinskii AYU *Klassicheskaya mekhanika i sily inertsii*. Moscow: Nauka; 1987. 320 p. (In Russ.)].
10. Берёзкин Е.Н. Курс теоретической механики. – М: МГУ, 1974. – 647 с. [Berezkin EN. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki*. Moscow: MGU; 1974. 647 p. (In Russ.)].
11. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. – М.: Мир, 1976. – Т. ½. – 439 с. [Feinman R, Leiton R, Sends M. *Feinmanovskie lektsii po fizike*. Moscow: Mir; 1976. Vol. ½. 439 p. (In Russ.)].

12. Галиуллин А.С. Аналитическая динамика. – М.: Высшая школа, 1989. – 264 с. [Galiullin AS. *Analiticheskaya dinamika*. Moscow: Vysshaya shkola; 1989. 264 p. (In Russ.)].
13. Bellman RE. *Adaptive Control Processes*. Princeton: Princeton Univ. Press, 1961. 276 p. doi: 10.1515/9781400874668
14. Mathews M, Steeg C. Final value controller synthesis. *IRE Transactions on Automatic Control*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); 1957;2(1):6-16. doi: 10.1109/tac.1957.1103775
15. Поляков В.А. Приспособляемость движения железнодорожного поезда // Динамика поезда и подвижного состава железных дорог. – 1990. – Вып. 273/37. – С. 107–117. [Polyakov VA. Prispoblyаемost' dvizheniya zheleznodorozhnogo poezda. *Dinamika poezda i podvizhnogo sostava zheleznykh dorog*. 1990;37(273):107-117. (In Russ.)].
16. Статистические модели и многокритериальные задачи принятия решения / под ред. И.Ф. Шиханова. – М.: Статистика, 1979. – 184 с. [Shikhanov IF, editor. *Statisticheskie modeli i mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya resheniya*. Moscow: Statistika; 1979. 184 p. (In Russ.)].
17. Кейн В.М., Смуров М.Ю. Управление самолётом на посадке в условиях неопределённости // Методы и средства навигации в УВД: сб. научных трудов. – Л.: Изд-во Академии ГА, 1980. – С. 37–45. [Kein VM, Smurov MYu. Upravlenie samoletom na posadke v usloviyakh neopredelennosti. *Metody i sredstva navigatsii v UVD: sb. nauchnykh trudov*. Leningrad: Akademii GA publ., 1980:37-45. (In Russ.)].
18. Дьяконов В.П. Энциклопедия компьютерной алгебры. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 1264 с. [D'yakonov VP *Entsiklopediya komp'yuternoï algebry*. Moscow: DMK Press; 2013. 1264 p. (In Russ.)].
19. Муха В.С. Вычислительные методы и компьютерная алгебра. – Минск: БГУИР, 2-е изд., испр. и доп., 2010. – 148 с. [Mukha VS. *Vychislitel'nye metody i komp'yuternaya algebra*. 2<sup>nd</sup> ed. Minsk: BGUIR; 2010. 148 p. (In Russ.)].
20. Панкратьев Е.В. Элементы компьютерной алгебры. – М.: Интуит.ру, Бином. Лаборатория Знаний, 2007. – 247 с. [Pankrat'ev EV *Elementy komp'yuternoï algebry*. Moscow: Intuit.ru, Binom. Laboratoriya Znaniy; 2007. 247 p. (In Russ.)].

#### Сведения об авторах:

**Поляков Владислав Александрович**, к.т.н., ст. научн. сотрудник;

адрес: 49005 Украина, г. Днепр, ул. Писаржевского, д. 5;

eLibrary SPIN: 5744-2789; ORCID: 0000-0002-4957-8028;

E-mail: p\_v\_a\_725@mail.ru

**Хачапуридзе Николай Михайлович**, к.т.н., ст. научн. сотрудник;

eLibrary SPIN: 2115-4942; ORCID: 0000-0003-0682-6068;

E-mail: itst@westa-inter.com

#### Information about the authors:

**Vladislav A. Polyakov**, Ph.D. of Engineering Sciences;

address: 49005, Dnipro city, Pisarzhevskogo st., h. 5;

eLibrary SPIN: 5744-2789; ORCID: 0000-0002-4957-8028;

E-mail: p\_v\_a\_725@mail.ru

**Nicholas M. Khachapuridze**: Ph.D. of Engineering Sciences;

eLibrary SPIN: 2115-4942; ORCID: 0000-0003-0682-6068;

E-mail: itst@westa-inter.com

**Цитировать:**

Поляков В.А., Хачапуридзе Н.М. Резоны и рациональная методика моделирования динамики магнитолевитирующего поезда / Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 92–105. doi: 10.17816/transsyst20195292-105

**To cite this article:**

Polyakov VA, Khachapuridze NM. Reasons for and Rational Methods of Magnetically Levitated Trains Dynamic Modelling. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):92-105. doi: 10.17816/transsyst20195292-105

## Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 656.025.4

DOI 10.17816/transsyst201952106-117

© С. А. Смирнов, О. Ю. Смирнова

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I  
(Санкт-Петербург, Россия)

### РОЛЬ ГРУЗОВОГО МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА В МИРОВОЙ ЭКОНОМИКЕ

**Обоснование:** В настоящий момент для осуществления грузовых перевозок используются такие виды транспорта, как автомобильный, водный, железнодорожный, воздушный и трубопроводный. Каждый вид грузового транспорта обладает специфическими конкурентными преимуществами, обеспечивающими наиболее результативное его применение на разных этапах логистической цепи. Экономическая эффективность грузовых перевозок оказывает влияние на общую экономическую эффективность, в частности, на валовой внутренний продукт. Актуальной является проблема качества экономического роста применительно к транспортной отрасли и ее вкладу в национальную экономику, так как при текущей организации взаимодействия видов транспорта высокими остаются транзакционные издержки.

**Цель:** Изучение влияния различных видов грузового транспорта, в том числе магнитолевитационного, на экономику и экономический рост.

**Методы:** Теоретические и эмпирические. В статье рассматривается влияние различных видов транспорта, функционирующих в сфере грузовых перевозок, на экономику страны. Производится сравнение действующих видов грузового транспорта с магнитолевитационным транспортом с точки зрения получаемых эффектов.

**Результаты:** Магнитолевитационный вид транспорта обладает новыми характеристиками и преимуществами, что позволяет рассматривать его как жизнеспособный и позволяющий обеспечивать при его внедрении качественный экономический рост и ресурсоориентированность экономики.

**Заключение:** Наиболее эффективное использование ресурсов с целью их неувеличения и сокращения достигается при введении в транспортную систему магнитолевитационного транспорта, поскольку его экономические характеристики уже сейчас превосходят экономические характеристики большинства видов транспорта. Очевидно, по мнению авторов, что при переходе к ресурсно ориентированной экономике Маглев будет основным видом транспорта в перевозках как грузов, так и пассажиров.

**Ключевые слова:** валовой внутренний продукт, классический подход к экономике грузовых перевозок, экономическая эффективность, мультипликативные эффекты, аддитивные эффекты, транспортно-логистическая инфраструктура, логистические цепи, транспортные расходы, магнитная левитация, грузовой Маглев.

## Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© S. A. Smirnov, O. Yu. Smirnova

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
(Saint Petersburg, Russia)

### MAGNETIC LEVITATION CARGO TRANSPORT ROLE IN WORLD ECONOMY

**Background:** Currently, the car, water, railway, air and pipe transports are used for cargo and goods transportation. Each kind of cargo transport has its own specific competitive advantages that provide its most effective application at various stages of logistics chain. The economic efficiency of cargo transportation influences the overall economic efficiency, in particular, the gross domestic product. The quality of economic growth as applied to transport branch and its input to the national economy is relevant, since with the current organisation of different transport modes interaction, there are still high transaction costs.

**Aim:** Study of influence of various modes of transport, including maglev transport, on the economy and economic growth.

**Methods:** Theoretical and empirical. The paper considers the influence of various modes of transport, that operate in the cargo transport sphere, on the country's economy. The comparison of existing modes of transport with the maglev transport from the point of view of desired effects is made.

**Results:** The maglev transport possesses new properties and advantages, which makes it possible to view it as viable and able to provide a qualitative economic growth and resource-based economy if realised.

**Conclusion:** The most efficient use of resources for the purpose of their non-increase and reduction is achieved with the introduction of maglev transport into the transport system, as its economic properties already now excel those of the majority of other types of transport. It is obvious, as the experts, that in transition to resource-based economy the maglev transport will be major transport for both cargo and passenger transit.

**Keywords:** gross domestic product, classical approach to cargo transportation, economic efficiency, multiplicative effect, additive effects, transport and logistics infrastructure, logistics chains, transport costs, cargo maglev.

## Введение

Магнитолевитационные транспортные технологии за последние годы приобрели для научного и технического сообщества особое значение. Дискуссии вокруг них не прекращаются, что вызвано значительной проработкой данных технологий и их практическим применением в ряде государств мира (Китайская Народная Республика, Республика Корея, Япония). Результаты внедрения в транспортную отрасль технологий, основанных на явлении магнитной левитации, варьируются в зависимости от страновых особенностей и влияют на функционирование других видов транспорта.

В настоящий момент Маглев используется только в сфере пассажирских перевозок. Перемещение грузов обеспечивается автомобильным, водным, железнодорожным, воздушным и трубопроводным видами транспорта. Иные виды грузового транспорта утратили свое значение (например, гужевой) или не получили широкого распространения (например, конвейерный). Грузовые перевозки могут носить как массовый, так и единичный характер [1, 2, 3].

### Анализ

Каждый из видов грузового транспорта имеет свои конкурентные преимущества, которые обеспечивают наиболее результативное использование каждого вида транспорта на разных этапах логистической цепи. Виды транспорта в некоторых случаях могут заменять друг друга, кроме того – интегрироваться в мультимодальные перевозки, имеющие очень высокую эффективность.

Наиболее существенные особенности различных видов грузового транспорта представлены в Табл. 1. Основное различие между видами грузового транспорта заключается в используемой инфраструктуре. Инфраструктура играет важную роль в логистических цепях и влияет на экономику грузовых перевозок [4, 5].

Таблица 1. Характерные особенности видов грузового транспорта

Характеристика грузового транспорта	Вид грузового транспорта				
	Автомобильный	Водный	Железнодорожный	Воздушный	Трубопроводный
Особенности инфраструктуры	Дороги общего пользования	В основном естественные водные пути, требуются порты	Специализированная инфраструктура, весовые ограничения	Естественная среда, требуются аэропорты	Специализированная инфраструктура
Особенности перевозочного процесса	От двери до двери, без специального расписания	Между портами, с графиком захода в порты	Между грузовыми станциями, по строгому расписанию	Между аэропортами, по строгому расписанию	Между пунктами входа и выхода, непрерывный
Особенности транспортных средств	Широкая номенклатура с различной грузоподъемностью и объемом тары	Большая вместимость	Стандартизованный подвижной состав	Стандартизованный подвижной состав ограниченной номенклатуры	Без транспортных средств
Номенклатура перевозимых грузов	Широкая, ограничена габаритами и грузоподъемностью	Не имеет ограничений	Широкая, ограничена габаритами и грузоподъемностью	Широкая, ограничена габаритами и грузоподъемностью	Жидкие, сыпучие грузы, газы
Особенности движения	Свободный график	Согласно условиям навигации	Согласно графику движения поездов	По расписанию	Поточное

Характеристика грузового транспорта	Вид грузового транспорта				
	<i>Автомобиль- ный</i>	<i>Водный</i>	<i>Железно- дорожный</i>	<i>Воздушный</i>	<i>Трубопровод- ный</i>
Устойчивость	Зависимость от погодных и дорожных условий	Зависимость от погодных условий	Зависимость от погодных условий	Зависимость от погодных условий	Высокая
Безопасность	Высокая аварийность	Относительно высокая	Средняя	Относительно высокая	Высокая
Экологичность	Большой объем выбросов	Средний объем выбросов	Средний объем выбросов	Средний объем выбросов	Низкий объем выбросов

Примеры грузовой транспортно-логистической инфраструктуры, представляющей собой технологический комплекс, предназначенный для организации движения товаров и оказания транспортно-логистических услуг, изображены на Рис. 1.



Рис. 1. Примеры грузовой транспортно-логистической инфраструктуры

Конфигурацию логистических цепей формируют виды транспортно-логистической инфраструктуры, а также условия и требования транспортировки. Наиболее сложными этапами с точки зрения логистики является те, которые касаются распределения грузов, основной транспорт при этом зачастую находится не в фокусе внимания [6]. Это объясняется необходимостью достижения локальной операционной эффективности, которая главенствует в классическом подходе к экономике грузовых перевозок (Рис. 2).

Классический подход к экономике грузовых перевозок учитывает основные центры затрат и различные эффекты, которые влияют на транспортные расходы. Эффекты разделены на группу аддитивных эффектов и группу мультипликативных эффектов (Рис. 2). Дополнительные эффекты касаются экстенсивных факторов транспортных расходов, которые позволяют улучшать качество обслуживания, но требуют дополнительных капитальных вложений и эксплуатационных расходов.

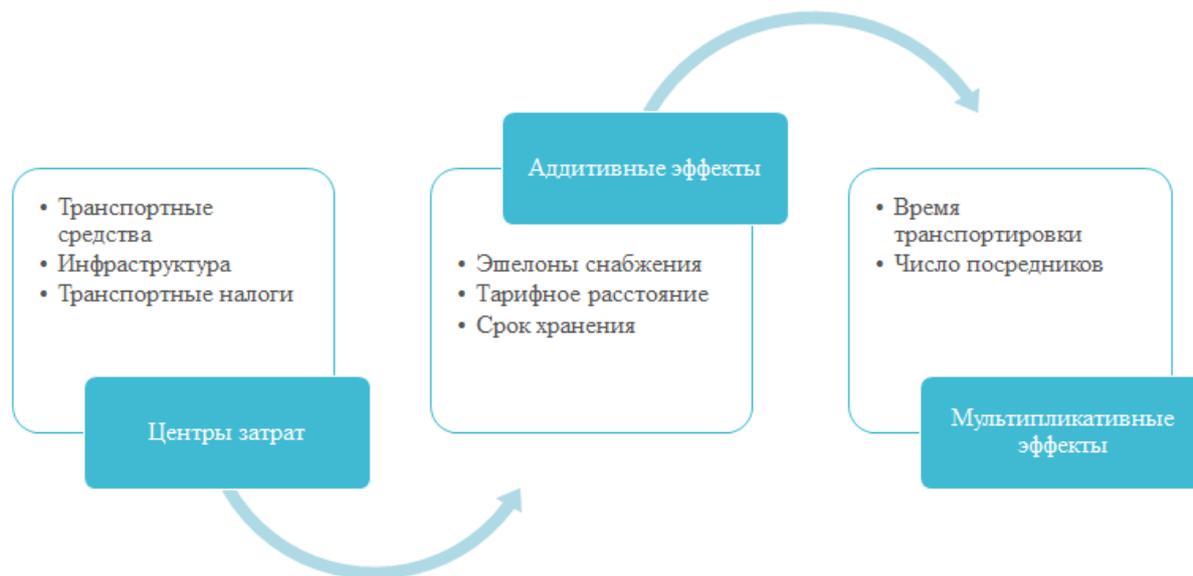


Рис. 2. Экономика грузовых перевозок

Основная идея заключается в том, что стоимость транспортной цепочки является суммой ее этапов. На стоимость этапа влияют его основные характеристики. Для транспортных эшелонов это расстояние, для складских – это срок хранения.

Мультипликативные эффекты имеют различную природу и имеют в качестве основной процентную ставку. Эти эффекты оказывают более серьезное влияние на стоимость конечного продукта. Например, одномесячная транспортная процентная ставка составляет до 0,5 % от стоимости груза. На следующих этапах распределения повышаются как процентные ставки, так и налог на добавленную стоимость, что приводит к росту цен на конечную продукцию. Именно эти эффекты находятся в центре внимания данного исследования.

Конфигурация участников транспортного рынка представлена на Рис. 3. При рассмотрении рынка в широком смысле количество участников оказывается значительно большим, чем количество участников, которые вовлечены непосредственно в перевозочный процесс. Неотъемлемыми участниками рынка также выступают грузоотправители и грузополучатели.

Участники рынка взаимодействуют между собой по вопросам, касающимся транспортно-логистической инфраструктуры, подвижного состава, ресурсов и сырья. Рынок регулируется нормативной базой, которая определяет его развитие и особенности ведения операционной деятельности [7, 8].

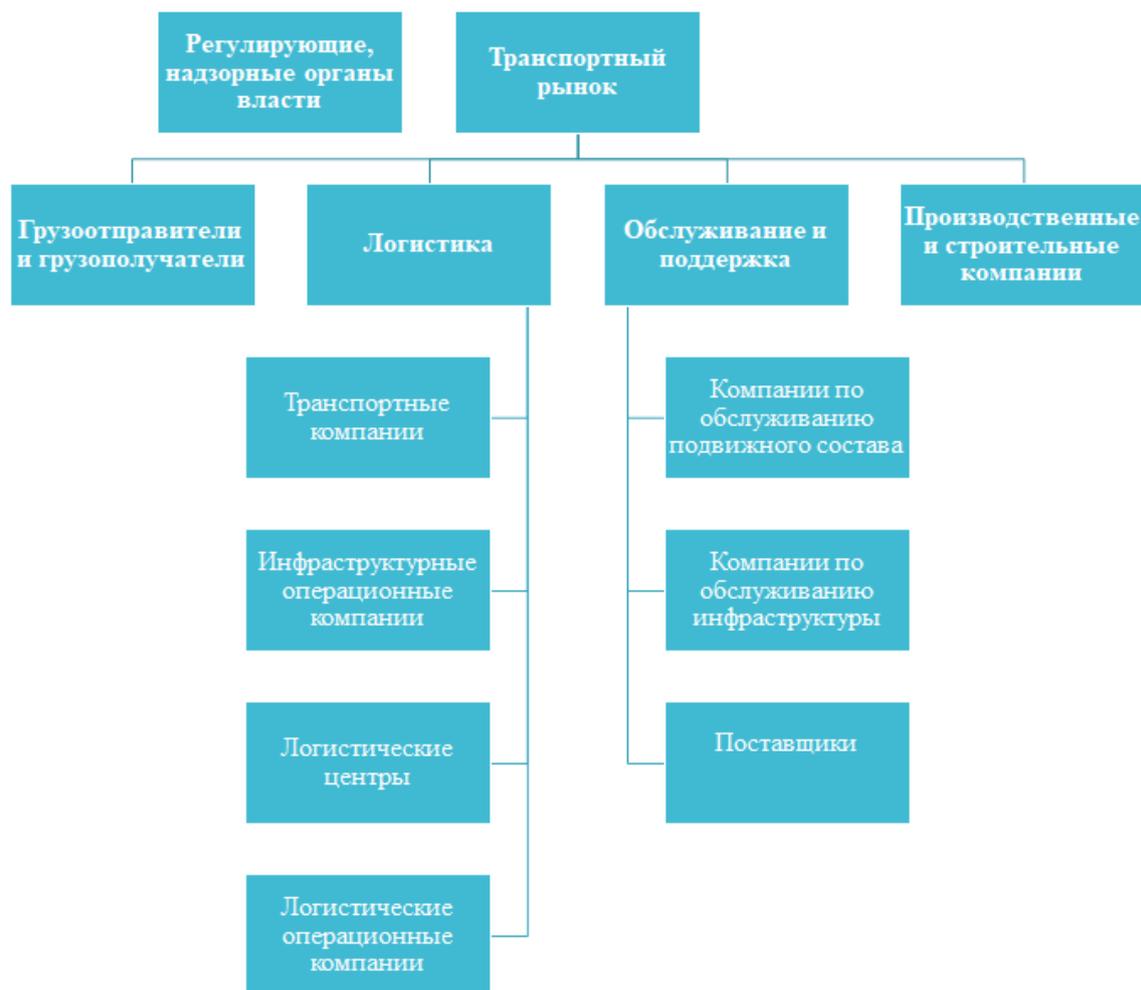


Рис. 3. Участники транспортного рынка

Интересы операционных компаний, с одной стороны, и интересы компаний по обслуживанию, компаний-производителей и компаний-поставщиков, с другой стороны, являются противоположными. Конфликты наблюдаются в следующих аспектах:

- устойчивость инфраструктуры;
- наличие подвижного состава;
- жизненный цикл подвижного состава;
- качество ресурсов и сырья.

Существует также один потенциальный конфликт, который связан с расширением транспортно-логистической инфраструктуры. Ситуации, когда одна и та же компания управляет инфраструктурой, занимается ее обслуживанием и таким образом принимает на себя все внутренние конфликты, не рассматривается. Все конфликты являются точкой компромисса, когда компании находят приемлемый баланс. Остальные компании не вовлечены в процесс и, несмотря на правила, чувствуют транзакционные издержки.

Стоимость конечного продукта определяется группой различных, связанных друг с другом, затрат. Мультипликативный эффект проявляется в росте стоимости каждой последующей стадии транспортного процесса вследствие роста стоимости каждой из предыдущих стадий.

Каждый транспортный эшелон включает в себя затраты на различные виды обслуживания, в том числе рентабельность сервисных компаний. Стоимость сервисного обслуживания включает затраты на сырье и ресурсы, включая норму возврата производителей и стоимость транспортировки, а также норму возврата транспортных компаний.

Транспортные расходы, безусловно, не являются самой большой частью в себестоимости конечной продукции, однако могут привести к ее удорожанию на несколько процентов.

Таким образом, на первый взгляд, описанная проблема оказывает негативное влияние на экономику. Но дальнейший анализ показывает, что ситуация гораздо сложнее.

Роль транспорта в валовом внутреннем продукте (ВВП) как основном показателе, характеризующем итоговую стоимость всех оказанных услуг и произведенной продукции в стране, высока (Рис. 4).



Рис. 4. ВВП и грузовые перевозки

Доля грузоперевозок в ВВП может достигать 25 %, транспортные расходы в стоимости товаров – 10 %. Непосредственно транспорт потребляет до 25 % произведенной энергии.

Сущность экономического роста представлена на Рис. 5. Традиционно экономический рост является зеркалом роста ВВП. При этом в результате расчетов вне зависимости от используемых подходов к подсчету ВВП (по расходам, по добавленной стоимости (производственный метод), по расходам) получается один и тот же показатель.



Рис. 5. Экономический рост

Экономическая эффективность грузовых перевозок оказывает влияние на общую экономическую эффективность. Однако неэффективная с точки зрения транзакционных издержек система ведет к росту ВВП (Рис. 6). Несмотря на то, что наблюдается занятость и рост потребления с точки зрения цен и увеличения инвестиций, негативной стороной является более низкое качество экономического роста, различный уровень эффективности участников рынка [10].



Рис. 6. Рост ВВП из-за интересов участников рынка

Влияние магнитолевитационного транспорта на рынок грузовых перевозок и, следовательно, на ВВП существенно отличается от аналогичного влияния используемых в настоящее время видов транспорта (Табл. 2). Измерение положительных эффектов, таких как качество экономического роста и промежуточное потребление, является сложной

задачей [11]. При этом уровень негативных последствий (сокращение фонда оплаты труда в сфере обслуживания, инвестиции, амортизация, корпоративная прибыль в обслуживании и строительстве, потребление ресурсов) рассчитывается.

*Таблица 2. Уровень взаимодействия оператора магнитолевитационного транспорта с другими участниками обеспечения движения по сравнению с остальными видами грузового транспорта*

Объект / Заинтересованная сторона	Обслуживание инфраструктуры	Обслуживание подвижного состава
Ифраструктурные операционные компании	Более высокая устойчивость	Меньше рисков чрезвычайных ситуаций
Транспортные компании	Оптимальные маршруты	Меньше обслуживания подвижного состава
Производственные и строительные компании	Меньше контрактов	Меньше обслуживания
Компании по обслуживанию подвижного состава	Меньше повреждений подвижного состава	Меньше обслуживания
Компании по обслуживанию инфраструктуры	Меньше обслуживания	Меньший ущерб инфраструктуре
Поставщики	Более низкий спрос	Более низкий спрос

Таким образом, проблема качественного экономического роста применительно к транспортной отрасли и ее вкладу в национальную экономику требует поиска сочетания наиболее эффективных видов транспорта. Это, в свою очередь, требует изменения нынешней экономической парадигмы на ресурсно-ориентированную, в рамках которой на первый план будут выходить долгосрочные интересы, обеспечивающие общественное процветание. Модель, в которой отстаиваются краткосрочные корпоративные интересы, наносящие ущерб экономике и обществу, должна уйти в прошлое, как нежизнеспособная со стратегической точки зрения [12, 13, 14, 15].

### Заключение

Объем потребления ресурсов человечеством давно превысил возможности экосистемы к их воспроизводству. В этой связи одной из важнейших задач транспорта и производства является минимизация потребления природных ресурсов, а также минимизация воздействия на окружающую среду посредством выбросов. Это требует осуществления структурных изменений в транспортной среде – внедрения инновационных видов транспорта.

Необходимость сокращения потребления ресурсов с целью устранения возникающих проблем в экосистемах в перспективе будет

неизбежно способствовать широкому внедрению магнитолевитационного транспорта, обладающего значимыми преимуществами перед другими видами не только грузового, но и пассажирского транспорта. Поскольку экономические характеристики Маглева, в том числе того, который уже функционирует в нескольких государствах мира, и того, технико-технологические параметры которого находятся в стадии разработки, уже сейчас превосходят экономические характеристики большинства видов транспорта, можно утверждать, что при переходе к ресурсно-ориентированной экономике магнитолевитационный транспорт будет основным видом транспорта в перевозках как грузов, так и пассажиров.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Научно-образовательного инженерного кластера «Российский Маглев».

### Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Под ред. В.А. Гапановича. – М: Физматлит, 2014. – 476 с. [Zaitsev AA, Antonov YuF. Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya. Gapanovich VA, editor. Moscow: Fizmatlit, 2014. 476 p. (In Russ.)].
2. Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт: ответ на вызовы времени // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – №1. – С. 5–13. [Zaitsev AA. Magnetolevitational transport: response to time challenges. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(1):5-13. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst2017315-13
3. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Морозова Е.И., Талашкин Г.Т. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны. – СПб: НП-Принт, 2015. – 140 с. [Zaitsev AA, Sokolova IV, Morozova EI, Talashkin GT. *Magnitolevitatsionnyi transport v edinoi transportnoi sisteme strany*. St. Petersburg: NP-Print; 2015. 140 p. (In Russ.)].
4. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г.: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р [Интернет]. Доступно по: [http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT\\_ID=13008](http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13008). Ссылка активна на 20.06.2019.
5. Лapidус Б.М., Лapidус Л.В. Железнодорожный транспорт: философия будущего. – М: Прометей, 2015. – 232 с. [Lapidus BM, Lapidus LV. *Zeleznodoroznyi transport: filosofia buduchego*. Moscow: Prometei; 2015. 232 p. (In Russ.)].
6. Журавлева Н.А., Панычев А.Ю. Проблемы экономической оценки скорости в транспортно-логистических системах в новом технологическом укладе //

- Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 4. – С. 150–178. [Zhuravleva NA, Panychev AY. Problems of economic assessment of speed in transport and logistical systems in the new technological paradigm. *Economics of transport*, 2017;3(4):150-178. (In Russ., In Engl.). doi: 10.17816/transsyst201734150-178
7. Терешина Н.П., Галабурда В.Г., Трихунков М.Ф. и др. Экономика железнодорожного транспорта / под ред. Н.П. Терешиной, Б.М. Лapidуса, М.Ф. Трихункова. – М: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2006. – 801 с. [Tereshina NP, Galaburda VG, Trikhunkov MF. *Economika jeleznodorojnogo transporta*. Tereshina NP, Galaburda VG, Trikhunkov MF, editors. Moscow: Uchebno-metodicheskii centr po obrazovaniyu na jeleznodorojnom transporte, 2006. 801 p. (In Russ.)].
  8. Витте С.Ю. Принципы железнодорожных тарифов по перевозке грузов. – СПб: ПГУПС, 1999. – 364 с. [Vitte SYu. *Principi jeleznodorojnognikh tarifov po perevozke gruzov*. St. Petersburg: PGUPS, 1999. 364 p. (In Russ.)].
  9. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения. – М: Физматлит; 2015. – 612 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA. *Magnitolevitatsionnyy transport: nauchnyye problem i tekhnicheskiye resheniya*. Moscow: Fizmatlit; 2015. 612 p. (In Russ.)].
  10. Зайцев А.А. Технология «Магтрансити» в проекте «Санкт-Петербургский Маглев» // Известия ПГУПС. – 2013. – № 4. – С. 5–17. [Zaitsev AA. Technology “Magtranscity” in the project “St. Petersburg Maglev”. *Izvestia PGUPS*. 2013;(4):5-17. (In Russ.)].
  11. Лapidус Б.М., Мачерет Д.А. Методология оценки и обеспечения эффективности инновационных транспортных систем // Экономика железных дорог. – 2016. – № 7. – С. 16–25. [Lapidus BM, Macheret DA. *Metodologiya otsenki i obespecheniya effektivnosti innovatsionnikh transportnikh sistem*. *Railway Economy*. 2016;(7):16-25. (In Russ.)].
  12. Зайцев А.А. О современной стадии развития магнитолевитационного транспорта // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 12. – С. 62–65. [Zaitsev AA. *O sovremennoy stadii razvitiya magnitolevitatsionnogo transporta*. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2016;(12):62-65. (In Russ.)].
  13. Вакуумно-левитационные транспортные системы: научная основа, технологии и перспективы для железнодорожного транспорта: коллективная монография членов и научных партнёров Объединённого учёного совета ОАО «РЖД» / под ред. Б.М. Лapidуса, С.Б. Нестерова. – М: РАС, 2017. – 192 с. [Lapidus BM, Nesterov SB, editors. *Vakuumno-levitacionnyye transportnye sistemy: nauchnaya osnova, tekhnologii i perspektivy dlya zheleznodorozhnogo transporta: collective monograph of members and scientific partners of the Joint Scientific Council of Russian Railways*. Moscow: RAS, 2017. 192 p. (In Russ.)].
  14. Городской транспорт и энергоэффективность. Модуль 5h. Экологически устойчивый транспорт: сборник материалов для политических деятелей в развивающихся городах. [Электронный ресурс] GIZ, Берлин, 2013. Режим доступа: <http://greenlogic.by/content/files/dad357e3aecd74d42c89c14e4d4fb872.pdf> Ссылка активна на 10.03.2019. [Gorodskoj transport i energoeffektivnost'. Modul 5h. *Ekologicheski ustojchivyy transport: sbornik materialov dlya politicheskikh deyatelej v razvivayushchihsyah gorodah*. [Internet]. [cited 2019 March 10]. Available from: <http://greenlogic.by/content/files/dad357e3aecd74d42c89c14e4d4fb872.pdf> (In Russ.)].

15. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Экономические аспекты грузового магнитолевитационного транспорта // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 1. – С. 108–118. [Smirnov SA, Smirnova OYu. Economic features of freight Maglev transport. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(1):108-118. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst201731108-118

**Сведения об авторах:**

**Смирнов Сергей Александрович;** Ведущий научный сотрудник;

адрес: 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9;

eLibrary SPIN: 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;

E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Смирнова Ольга Юрьевна,** Старший научный сотрудник;

eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;

E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Information about the authors:**

**Sergey A. Smirnov,** Leading Researcher;

eLibrary SPIN: 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;

E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Olga Yu. Smirnova,** Senior Researcher;

eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;

E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Цитировать:**

Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Роль грузового магнитолевитационного транспорта в мировой экономике // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 106–117. doi: 10.17816/transsyst201952106-117

**To cite this article:**

Smirnov SA, Smirnova OYu. Magnetic Levitation Cargo Ransport Role in World Economy. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):106-117. doi: 10.17816/transsyst201952106-117

## Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 336.5.01

DOI: 10.17816/transsyst201952118-129

© Я. В. Соколова

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I  
(Санкт-Петербург, Россия)

### ОБ ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА НАЦИОНАЛЬНУЮ ЭКОНОМИКУ

**Обоснование:** Развитие науки в России сегодня остро нуждается в комплексной государственной поддержке. Фундаментальные исследования создают основы для детализации инновационных идей и через прикладные исследования приближают их к разработкам и внедрению. Обеспечить устойчивость экономики страны возможно только при условии вложений ресурсов в актуальные научные исследования.

В сложившихся условиях особую актуальность приобретает разработка инструментов оценки дополнительных эффектов от осуществления расходов на инновационное развитие (ИР).

**Цель:** Оценка влияния на национальную экономику расходов на ИР компаний.

**Методы:** Поиск и анализ

1. вариантов оценки имеющейся информации о результатах научных исследований (как запатентованных, так и не имеющих официального статуса зарегистрированной интеллектуальной собственности);
2. способов получения экономической выгоды от обладания результатами научных исследований при отсутствии возможности внедрения их в деятельность компании или продажи.

Для оценки влияния на национальную экономику расходов на ИР предлагается использовать показатель инновационной поддержки национальной экономики (ИПНЭ).

**Результаты:** Предложен алгоритм расчета показателя ИПНЭ. Релевантными для расчета предлагается признавать расходы компании-резидента, самостоятельно ведущей разработки или с привлечением отечественного сектора генерации знаний и высшего образования:

- на выплату заработной платы с учетом страховых взносов;
- на закупку оборудования и материалов отечественного производства;
- на оплату работ, услуг сторонних организаций.

Все остальные расходы на данном этапе предлагается считать нерелевантными.

Показатель может быть рассчитан для любой компании-резидента независимо от вида деятельности и направленности научных исследований в целях ИР.

**Заключение:** Для компаний, осуществляющих значительные вложения в научно-техническое, инновационное развитие, увеличение показателя ИПНЭ может стать дополнительным стимулом (при мерах государственной поддержки), позволит обратить внимание на существующий потенциал российской науки, сохранить и приумножить количество научных школ, поддерживать высокое качество разработок, их результативность.

**Ключевые слова:** инновационное развитие, оценка результатов НИОКР, показатель инновационной поддержки национальной экономики

## Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© Ia. V. Sokolova

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
(St. Petersburg, Russia)

### ON ASSESSMENT OF INFLUENCE OF INNOVATION ACTIVITIES RESULTS ON THE NATIONAL ECONOMY

**Background:** Development of Science in Russia is currently in urgent need of a thorough support from the state. Fundamental researches create ground for detalisation of innovative ideas and bring them closer through applied research to their developments and implementation. Ensuring sustainability of the country's economy is possible only through contributing resources to researches of immediate relevance.

Under existing conditions, special relevance is acquired by development of tools for assessment of additional effects of financing innovative development.

**Aim:** The purpose of this study is to assess the impact on the national economy of the costs on innovative development of companies.

**Methods:** Search for and analysis of:

1. options of assessment of available information about results of scientific researches (both patented and those that are not officially registered as intellectual property);
2. ways of deriving economic benefit from owning scientific researches' results with absence of opportunity for their introduction into a company's activity or for selling.

To assess the influence of expenses for innovative development on the national economy, the index of innovation support for the national economy (ISNE) is suggested to be used.

**Results:** The algorithm for calculation of ISNE is presented. It is suggested to consider relevant for calculation those expenses of the companies, that work on development independently or with the help of national knowledge generation sector and higher education. These expenses are for:

- salaries, considering premium;
- procurement of national equipment and materials;
- paying for work carried out and services rendered by contracted companies.

All other expenses at this stage are suggested to be deemed as irrelevant.

The factor can be calculated for each company-resident, irrespective of type of activity and field of scientific researches for ID purposes.

**Conclusion:** For companies that investing considerably in scientific and technical, innovative development, the increase of ISNE can be an additional incentive (with governmental support), will help in drawing attention to existing potential of the Russian science, save and multiply number of scientific schools, maintain high quality of scientific development and their effectiveness.

**Keywords:** innovative development, assessment of results of scientific research and engineering activities, index of innovation support for the national economy

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях внешних и внутренних кризисных явлений необходимость опережающего роста, качественного экономического развития приобретает особое значение. Обеспечить устойчивость и развитие экономики страны возможно только при условии вложений ресурсов в актуальные научные исследования.

Россия по общему объему финансирования науки (по паритету покупательной способности) занимает с показателем \$ 47,2 млрд девятое место в мире, уступая США (\$ 543,2 млрд), Китаю (\$ 496,0 млрд), Японии (\$ 170,9 млрд), Германии (\$ 131,2 млрд), Республике Корея (\$ 59,9 млрд), Франции (\$ 67,7 млрд), Великобритании (\$ 49,3 млрд) и Индии (\$ 47,2 млрд) [1].

Важной является не только декларация необходимости реализации научно-технического потенциала, но и обеспечение поддержки на государственном уровне посредством финансирования из бюджета, разработки комплекса мер по стимулированию компаний к проведению НИОКР собственными силами или с привлечением специализированных научных учреждений. Кроме того, особое значение имеет качественный уровень проводимых исследований, нацеленных на получение конкретного результата, способного внести существенный вклад в ускорение вывода российской экономики из стадии стагнации, в которой она, согласно докладу на Московском академическом экономическом форуме (МАЭФ-2109) А. Г. Аганбегяна, находится с 2013 года [2].

Сегодня недооцениваются последствия существующей разрушительной тенденции утраты научных школ, сохранение и развитие которых, как механизма создания и распространения знаний, является важнейшим условием обеспечения высокого качества и глубины проводимых исследований, повышения их результативности через внедрение и коммерциализацию.

Фундаментальные исследования создают основы, предпосылки для детализации инновационных идей и через прикладные исследования приближают их к разработкам и внедрению.

Одной из целей данного исследования является привлечение внимания к острой необходимости комплексной государственной поддержки научно-технических разработок.

## Методы

На сегодняшний день компании, ведущие разработки в целях развития своей деятельности, повышения конкурентоспособности, увеличения или удержания доли рынка, выхода на новые рынки, стремящиеся к инновационному развитию (ИР), сталкиваются с задачей оценки эффективности расходов на такие разработки.

Толковый словарь С.И. Ожегова определяет развитие как процесс закономерного изменения, перехода из одного состояния в другое, более совершенное; переход от старого качественного состояния к новому, от простого к сложному, от низшего к высшему [3].

При инновационном развитии доминирует стремление ускорить, интенсифицировать переходный процесс.

В толковом словаре «Инновационная деятельность» под ИР понимается преобразование всех сфер экономики и социальной системы на основе научно-технических достижений [4].

Научно-технический прогресс играет важнейшую роль в решении значимых социально-экономических задач, таких, как улучшение условий труда, снижение нагрузки на окружающую среду, повышение уровня жизни населения, и неотделим от достижений, получаемых в результате инновационной деятельности.

Основными показателями инновационной деятельности по данным Росстата являются:

- инновационная активность организаций;
- удельный вес организаций, осуществляющих технологические инновации, в общем числе оцениваемых компаний;
- данные об отгруженных товарах собственного производства, в том числе инновационных товаров, работ, услуг;
- затраты на технологические инновации;
- удельный вес затрат на технологические инновации в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг;
- удельный вес организаций, осуществляющих инновации (организационные, маркетинговые, экологические), в общем числе оцениваемых организаций<sup>1</sup> [5].

Росстатом ежегодно проводится работа по систематизации данных о науке, инновациях, формированию показателей эффективности экономики России, включающих индекс производительности труда по основным отраслям экономики и субъектам Российской Федерации, долю высокотехнологичных и наукоемких отраслей экономики в ВВП и ВРП, и другие.

Ежегодно собираются данные об организациях (количество, тип, сектор деятельности), выполнивших научные исследования и разработки, о численности занятого в исследованиях персонала, финансировании науки из средств федерального бюджета, видах и объемах внутренних затратах, распределенных по субъектам Российской Федерации, видам экономической деятельности, приоритетным направлениям и социально-экономическим целям.

---

<sup>1</sup> По данным годовой формы федерального статистического наблюдения № 4-инновация «Сведения об инновационной деятельности организации».

По данным Росстата за 2017 год инновационная активность организаций оценивается в 8,5 %, при этом удельный вес организаций, осуществляющих технологические инновации, – 7,5 % в общем числе обследованных организаций.

Таблица 1. Затраты на научные исследования и разработки по Российской Федерации [5]

	2000	2005	2010	2015	2016	2017
<b>Внутренние текущие затраты на научные исследования и разработки по видам затрат по Российской Федерации, млн. руб.</b>						
Внутренние текущие затраты на научные исследования и разработки – всего	73873,3	221119,5	489450,8	854288,0	873778,7	950257,0
в том числе по видам затрат:						
оплата труда	27762,7	94274,4	241472,2	398143,7	402793,5	437788,8
страховые взносы на ОПС, ОМС, ОСС	10419,2	22597,4	47904,6	104167,6	105441,3	114318,8
приобретение оборудования	3433,4	9936,2	18067,7	28480,2	24412,2	21750,6
другие материальные затраты	17470,9	51304,4	89279,0	157810,4	174467,8	186670,1
прочие текущие затраты	14787,2	43007,1	92727,3	165686,1	166663,9	189728,6
<b>Финансирование науки из средств федерального бюджета<sup>1)</sup>, млн. руб.</b>						
Расходы на гражданскую науку из средств федерального бюджета	17396,4	76909,3	237644,0	439392,8	402722,3	377882,2
В процентах:						
к расходам федерального бюджета	1,69	2,19	2,35	2,81	2,45	2,30
к валовому внутреннему продукту	0,24	0,36	0,51	0,53	0,47	0,41
<b>Расчетные показатели</b>						
Доля финансирования текущих затрат на науку из федерального бюджета, %	23,6	36,5	47,7	51,5	46,1	39,8
Динамика ежегодного изменения внутренних текущих затрат на науку, коэф.		1,18	1,06	1,07	1,02	1,09

<sup>1)</sup> 2000-2006 гг. – в соответствии с Приложением 2 к федеральным законам «Об исполнении федерального бюджета»; 2007-2017 гг. отчет об исполнении консолидированного бюджета Российской Федерации и бюджетов государственных внебюджетных фондов (по данным Федерального Казначейства; на 1 января года, следующего за отчетным периодом).

В целом за 2017 год внутренние текущие затраты на научные исследования и разработки в стране, включая финансируемые из-за рубежа, но исключая выплаты, сделанные за рубежом, составили 950 257 млрд. руб., из них на фундаментальные исследования направлено 14,9 %, на прикладные – 18,1 %, на разработки – 67,0 %.

Из средств федерального бюджета финансирование науки составило 39,8% от общих внутренних текущих затрат, которые распределяются по основным видам: оплата труда, страховые взносы на ОПС, ОМС, ООС, приобретение оборудования, другие материальные затраты и прочие текущие затраты.

Данные за последние годы, приведенные в Табл. 1, свидетельствуют о постоянном увеличении размеров финансирования, об изменении доли финансирования научных исследований и разработок из федерального бюджета. В условиях внутривосточных кризисных явлений, происходивших в 2000 году, размер данного показателя имел минимальное значение – 23,5 % внутренних текущих затрат, максимальное – в 2013 году – 64,9 %.

Существующие на сегодняшний день размеры финансирования научно-технических работ не позволяют обеспечить прорыв, необходимый для вывода экономики России из стагнации для последующего роста.

По данным доклада С.Ю. Глазьева, представленного в 2019 году на Московском академическом экономическом форуме (МАЭФ-2019), по международной оценке отношения внутренних затрат на исследования и разработки в России и странах Организации экономического сотрудничества и развития в процентах ВВП Россия занимает 21 место с показателем 1,12 %, первое место занимает Израиль с показателем 4,38 % [1].

Израильский опыт коммерческой реализации научных разработок достоин особого внимания.

Комплексный подход к развитию инноваций в Израиле позволил занять одно из первых мест в мире по привлекательности для осуществления разработок, стартапов, проектов на стадии роста.

Сегодня каждая пятая компания высоких технологий, котирующаяся на Нью-Йоркской бирже NASDAQ – израильская или бывшая израильская фирма. На NASDAQ котируется больше израильских компаний, чем всех европейских, вместе взятых [6].

По экспертным оценкам уровень внедрения результатов научных разработок в Израиле достигает 25 % [7].

Получение подобной оценки в России не представляется возможным из-за отсутствия релевантных исходных данных, по мнению некоторых специалистов этот показатель близок к нулю.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В Рекомендациях по разработке программ инновационного развития акционерных обществ с государственным участием (далее – Рекомендации) [8] определены основные задачи, такие как содействие модернизации и технологическому развитию компаний путем значительного улучшения основных показателей эффективности производственных процессов, включая уменьшение себестоимости выпускаемой продукции (услуг) более чем на 10 %, экономию энергоресурсов не менее 5 % ежегодно, улучшение потребительских свойств предлагаемого продукта, повышение производительности труда не менее 5 % ежегодно, а также экологичности процесса производства и утилизации отходов производства.

Основные показатели (индикаторы) программ ИР в Рекомендациях сгруппированы следующим образом:

1) показатели финансирования и результативности НИОКР (объем финансирования за счет собственных средств, количество патентов, разработанных и внедренных в производство технологий в единицах);

2) показатели технологического лидерства (количество патентов, защищенных патентами продуктов, полученных за последние три года, качество инновационного портфеля, определяемое из соотношения между прорывными и улучшающими проектами);

3) показатели эффективности инновационной деятельности (процент от продаж новых, не старше трех лет, продуктов в общем объеме продаж, эффективность внедрения);

4) показатели результативности корпоративной системы управления инновациями (количество инновационных предложений, проектов сотрудников и ожидаемый потенциал их окупаемости, количество действующих динамично развивающихся проектов, продолжительность цикла инновационного процесса или его отдельных стадий);

5) показатели эффективности взаимодействия с внешними источниками разработок и инноваций (количество инновационных предложений от сторонних организаций, процент продаж от реализации разработок, полученных извне).

Получение данных по рекомендованным показателям позволяет количественно оценить результат внедрения признанных на рынке конкретных инновационных разработок, способных генерировать денежный поток от продажи.

При этом существует сложность оценки тех разработок, результаты которых не внедряются непосредственно в производственный процесс, нацелены на улучшение качественных и/или количественных характеристик деятельности компании.

Параметрами оценки в таком случае являются результаты, оформленные в виде прав на интеллектуальную собственность (патенты на

полезные модели, изобретения и др.). При этом оценивать экономическую эффективность патента, по которому не выплачивается роялти, можно только экспертным путем.

Таким образом, особенно актуальной становится необходимость разработки инструментов стимулирования повышения компаниями расходов на ИР.

Сегодня, при оценке внутренних текущих затрат на научные исследования и разработки в составе статьи «Другие материальные затраты» учитывается стоимость приобретаемых со стороны сырья, материалов, комплектующих изделий, полуфабрикатов, топлива, энергии, работ и услуг производственного характера и другое [5]. При этом не выделяются затраты на покупку импортных и отечественных материальных ценностей. Отдельно не отражаются расходы на оплату работ, услуг соисполнителей, не учитывается статус резидентства.

Рекомендации предписывают при создании системы управления инновациями учитывать необходимость значительного расширения внедрения компаниями результатов исследований и разработок, выполняемых в отечественном секторе генерации знаний и высшего образования [8]. При этом отследить выполнение данного положения невозможно из-за отсутствия контрольных показателей и недостаточности данных, сбор которых обеспечивает Росстат.

Предлагаемый подход к оценке уровня осуществленных расходов на НИР и ОКР нацелен на разработку перечня мер стимулирующего характера, позволяющих обеспечить достаточные объемы финансирования науки.

Расходы на проведение научных исследований, а также на инициирование и создание инноваций с целью ускорения развития деятельности компании, организованные силами компании-резидента или выполняемые научными российскими организациями, влияют на национальную экономику, обеспечивая ее развитие путем внедрения результатов научных разработок.

Выплачивается заработная плата исследователям, ученым, инженерам и специалистам, задействованным в разработке, покрываются накладные расходы организации, производится закупка материалов и оборудования для выполнения работ, начисляются налоги. Кроме того, могут быть предусмотрены командировочные, служебные и транспортные расходы, оплата услуг связи и прочее.

Для универсальной оценки влияния на национальную экономику расходов на ИР предлагается использовать показатель инновационной поддержки национальной экономики (ИПНЭ).

Вопрос исчисления данного показателя является дискуссионным. Предложенный авторский подход может быть улучшен в ходе обсуждения экспертным сообществом вариантов расчета.

Релевантными для расчета предлагается признавать расходы компании, самостоятельно ведущей разработки или с привлечением отечественного сектора генерации знаний и высшего образования:

- на выплату заработной платы с учетом страховых взносов (в ПФ, ФСС, ФФОМС, ТФОМС), причем как штатным сотрудникам из фонда оплаты труда (ФОТ) организации, так и вовлеченным в работу по договорам гражданско-правового характера (ГПХ);

- на закупку оборудования и материалов только отечественного производства, поскольку рассчитывается влияние именно на экономику страны, в которой проводится исследование;

- на оплату работ, услуг сторонних организаций. Зачастую для выполнения работы необходимо привлечение соисполнителей, такие расходы предлагается учитывать с коэффициентом 0,5 в случае привлечения в качестве соисполнителя компании-резидента. Использование понижающего коэффициента обосновано тем, что, во-первых, расходы на оплату работ и услуг сторонних организаций обеспечивают общий результат, и основной исполнитель несет ответственность за действия соисполнителя, как за свои собственные. Во-вторых, соисполнитель является третьим лицом, чей вклад при оценке влияния на национальную экономику компании-заказчика должен учитываться в меньшем размере. В случае вклада сторонних организаций более 50 % от общей суммы расходов выбор исполнителя работы становится некорректным, так как большая ее часть выполняется силами третьих лиц.

Все остальные расходы, даже с учетом вероятной значительной доли в общем объеме, на данном этапе предлагается считать нерелевантными.

Перечень выбранных статей расходов с порядком расчета их влияния на обобщающий показатель ИПНЭ приведен в Табл. 2.

Таблица 2. Статьи расхода и порядок расчета ИПНЭ (первый этап)

Показатель	База исчисления, единица измерения	Шкала значений
Расходы на заработную плату и ЕСН	ФОТ + оплаты по договорам ГПХ + ЕСН, млн. руб.	1 за каждый млн. руб.
Закупка материалов и оборудования отечественного производства	Стоимость закупки товарно-материальных ценностей без учета НДС, млн. руб.	1 за каждый млн. руб.
Расходы на оплату работ, услуг сторонних организаций-резидентов (не более 50 % от общей суммы)*	Стоимость по договору без учета НДС, с коэффициентом 1/2, млн. руб.	0,5 за каждый млн. руб.

\*При величине расходов на сторонние организации более 50 % от общей суммы расходов, данному показателю присваивается нулевое значение.

Полученное цифровое значение характеризует уровень расходов на получение нового продукта, услуги, процесса, качественно отличающихся от существующих с целью увеличения результативности деятельности.

На втором этапе расчетов необходимо учесть степень внедрения полученных в ходе научных работ результатов.

Это предлагается сделать с помощью коэффициента внедрения:

- результаты внедрены в деятельность компании полностью – 1,0;
- результаты внедрены частично – 0,5;
- результаты не внедрены – 0.

Путем умножения величины, отражающей уровень расходов внутри национальной экономики и коэффициента внедрения, получаем показатель ИПНЭ, позволяющий сравнивать компании разных видов деятельности и с разным масштабом инновационного развития и его продуктивности.

Рассчитывать показатель можно для отдельных компаний, отраслей промышленности, регионов, стран при наличии необходимых исходных данных.

### Заключение

Цель введения нового показателя – дополнительный контроль на государственном уровне за процессами, оказывающими влияние на национальную экономику для создания системы государственной поддержки компаний, готовых увеличивать расходы на научные исследования и разработки.

Для компаний, осуществляющих значительные вложения в научно-техническое, инновационное развитие, увеличение данного показателя может стать дополнительным стимулом, позволит обратить пристальное внимание на существующий потенциал российской науки, сохранить и приумножить количество научных школ, поддерживать высокое качество разработок, повысить их результативность.

**Автор заявляет, что** настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### Библиографический список / References

1. Глазьев С.Ю. Трансформация международных отношений в условиях смены технологических укладов. Доступно по: <http://www.myshared.ru/slide/983569>. Ссылка активна на 05.07.2019. [Glaz'yev SYu. Transformatsiya mezhdunarodnykh otnosheniy v usloviyakh smeny tekhnologicheskikh ukladov. [Internet]. [cited 2019 Jul 05]. Available from: <http://www.myshared.ru/slide/983569> (In Russ.)].
2. Московский академический экономический форум «Перспективы социально-экономического развития и роль науки: академический дискурс». Доступно по: <http://www.veorus.ru/maef/about/> Ссылка активна на 25.05.2019. [Moskovskiy akademicheskij ekonomicheskij forum "Perspektivy sotsial'no-ekonomicheskogo

- razvitiya i rol' nauki: akademicheskiy diskurs". [Internet]. [cited 2019 May 25]. Available from: <http://www.veorus.ru/maef/about/> (In Russ.).
3. Ожегов С.И., Шведова Н.Ю. Толковый словарь русского языка. – М.: ОНИКС, 2012. – 1376 с. [Ozhegov SI, Shvedova NYu. *Tolkovyy slovar' russkogo yazyka*. Moscow: ONIKS, 2012. 1376 p. (In Russ.).]
  4. Зверев В.С., Зверев В.С., Унтура Г.А. и др. Толковый словарь «Инновационная деятельность»: термины инновационного менеджмента и смежных областей (от А до Я). – Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2010. – 183 с. [Zverev VS, Zverev VS, Untura GA, et al. *Tolkovyy slovar' "Innovatsionnaya deyatel'nost'": terminy innovatsionnogo menedzhmenta i smezhnykh oblastey (ot A do Ya)*. Novosibirsk: IEOPP SO RAN, 2010. 183 p. (In Russ.).]
  5. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. Доступно по: <http://www.gks.ru/>. Ссылка активна на 10.04.2019 г. [Ofitsial'nyy sayt Federal'noy sluzhby gosudarstvennoy statistiki. Available from: <http://www.gks.ru/> (In Russ.) Accessed April, 10, 2019].
  6. 20 % компаний, котирующихся в NASDAQ, – израильские. Доступно по: <https://shofar7.com/2015/05/17/20-компаний-котирующихся-в-nasdaq-израильс/> Ссылка активна на 10.04.2019 г. [20% kompaniy, kotiruyushchikhsya v NASDAQ, – izrail'skiye. [Internet]. [cited 2019 April 10]. Available from: <https://shofar7.com/2015/05/17/20-компаний-котирующихся-в-nasdaq-израильс/> (In Russ.).]
  7. На старт... внимание... up! Hi-tech в Израиле: индустрия стартапов. Доступно по: <http://itbusinessweek.com/startup-industry-in-israel/>. Ссылка активна на 10.04.2019 г. [Na start... vnimaniye... up! Hi-tech v Izraile: industriya startupov. [Internet]. [cited 2019 April 10]. Available from: <http://itbusinessweek.com/startup-industry-in-israel/>. (In Russ.).]
  8. Рекомендации по разработке программ инновационного развития акционерных обществ с государственным участием, государственных корпораций и федеральных государственных унитарных предприятий. Утв. решением Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 3 августа 2010 г., протокол № 4 Доступно по: [https://itk-mdl.asutk.ru/upload/doc/rekomend\\_po\\_razrabotke\\_pro.pdf](https://itk-mdl.asutk.ru/upload/doc/rekomend_po_razrabotke_pro.pdf). Ссылка активна на 10.04.2019 г. [Rekomendatsii po razrabotke programm innovatsionnogo razvitiya aktsionnykh obshchestv s gosudarstvennym uchastiyem, gosudarstvennykh korporatsiy i federal'nykh gosudarstvennykh unitarnykh predpriyatiy. Utv. resheniyem Pravitel'stvennoy komissii po vysokim tekhnologiyam i innovatsiyam ot 3 avgusta 2010 g., protokol № 4. [Internet]. [cited 2019 April 10]. Available from: [https://itk-mdl.asutk.ru/upload/doc/rekomend\\_po\\_razrabotke\\_pro.pdf](https://itk-mdl.asutk.ru/upload/doc/rekomend_po_razrabotke_pro.pdf) (In Russ.).]

#### Сведения об авторе:

**Соколова Яна Викторовна**, кандидат экономических наук, MBA

eLibrary SPIN: 2817-4647; ORCID 0000-0002-1230-1893;

E-mail: nozpgups@gmail.com

#### Information about the author:

**Iana V. Sokolova**, Candidate of Economic Science (PhD), MBA,

eLibrary SPIN: 2817-4647; ORCID 0000-0002-1230-1893;

E-mail: nozpgups@gmail.com

**Цитировать:**

Соколова Я.В. Об оценке влияния результатов инновационной деятельности на национальную экономику // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 118–129. doi: 10.17816/transsyst201952118-129

**To cite this article:**

Sokolova IaV. On Assessment of Influence of Innovation Activities Results on the National Economy. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):118-129. doi: 10.17816/transsyst201952118-129

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS: Transport and Transport & Logistics Systems

DOI 10.17816/transsyst201952130-138

© R. Kircher<sup>1</sup>, J. Kluehspies<sup>1</sup>, E. Fritz<sup>2</sup>, R. Koehler<sup>3</sup>

<sup>1</sup>The International Maglev Board  
(Deggendorf, Germany)

<sup>2</sup>IfB - Institut für Bahntechnik  
(Dresden, Germany)

<sup>3</sup>thyssenkrupp Transrapid GmbH  
(München, Germany)

## MOBILITY ON DEMAND – VISION OF A FLEXIBLE FUTURE URBAN MOBILITY

**Background:** The present situation in megacities is characterized by traffic congestion, capacity limits of public transportation systems. In addition, environmental regulations due to potential health risks will have an increasing impact on urban transportation systems.

**Aim:** In this paper, we describe major technology trends in transportation and in information and communication systems which will influence urban transportation in future megacities. Based on these trends a vision of a sustainable urban transportation system is developed.

**Method:** In a first step, trends in urban development and the individual needs are analyzed. Digitalization of transportation and communication technologies offer new business opportunities for Artificial Intelligence (AI) based services.

**Results:** The intelligent combination of advanced transportation technologies in large buildings and AI based services enables a vision of “Mobility on Demand”, representing a flexible and sustainable urban transportation in future megacities.

**Conclusion:** The vision “Mobility on Demand” illustrates the effective and flexible integration of individual transportation needs into public transportation systems. Depending on the standards of future individual vehicles such vehicles could be integrated seamlessly into the urban Maglev transportation system.

**Keywords:** Urban transportation, megacities, individual needs, linear drives, Maglev

## INTRODUCTION

Today’s situation of urban transportation in many large cities is characterized by road traffic congestion, especially by the individual traffic. An increasing problem is the lack of sufficient parking space in the downtown area of large cities. Air pollution presently attracts growing attention and already results in environmental regulations to limit hazardous emissions by vehicles powered by internal combustion engines (ICE). Among them NO<sub>x</sub> and particulate matter are considered to have a negative impact on quality of life and health. Public transportation systems such as subway, express way and buses are already reaching their limit of transportation capacity, at least during several

hours a day. In 2018, 55 percent of the world's population are residing in urban areas. By the year 2050, 68 percent of the world's is projected to be urban [1]. With an increasing influx of the population from rural areas this trend will continue during the next decades, and it is expected that at the end of the 21<sup>st</sup> century more than 90 percent of the worldwide population will reside in megacities, as illustrated in Fig 1.

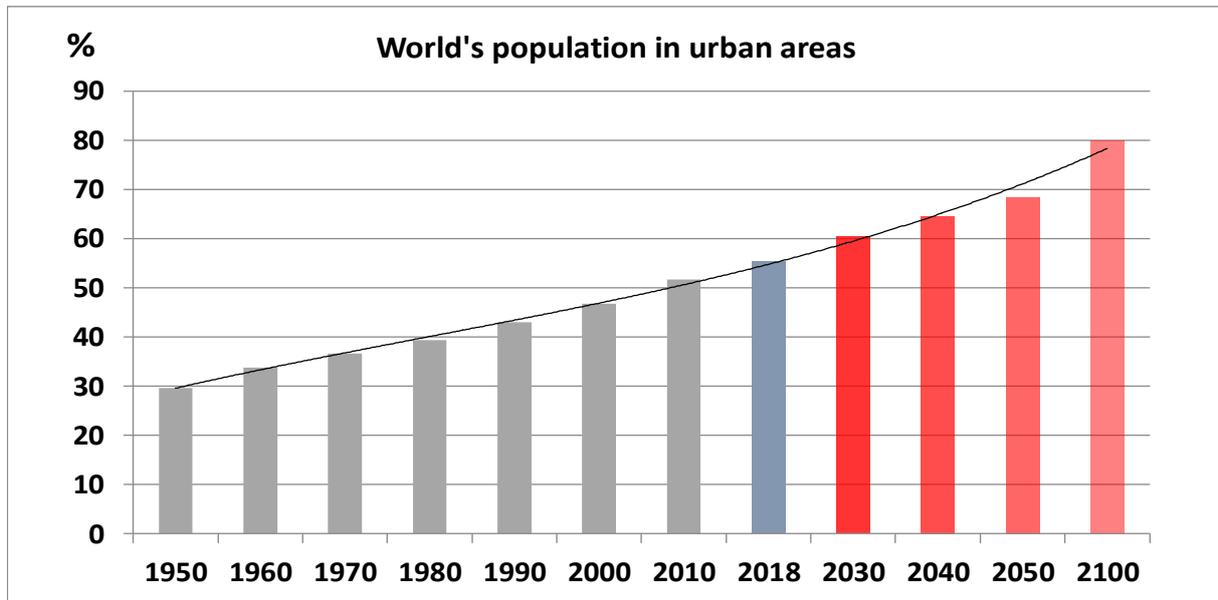


Fig. 1. Development of the world's population residing in urban areas [1]

This trend will lead to increasing costs of building ground and housing construction. Therefore, to utilize the available space in a most efficient way the housing construction will target to large buildings with a maximum use of the available area. In addition, energy efficiency, sustainability and comfort will become increasingly important in building construction. To keep pace with this development about two third of all cities worldwide have to be planned and constructed [2]. On the other hand, commuting traffic will increase with growing distance between working and living place. For comfort reasons short and flexible connections to long distance transportation systems become important. Short travel and transfer time are further personal needs, too. Avoiding potential conflicts of interests between personal needs and higher-ranking needs of the general public could be a challenge.

Presently common urban transportation systems in most large cities are operating at the limit of their transportation capacity. Expansion of these systems is restricted by limited available area, problems in public acceptance, increasing construction costs and municipal households. Therefore, innovative solutions are required to manage future urban transportation. In this paper, we investigate how advanced technologies of mobility combined with state of the art information and communication technologies can contribute to a sustainable and flexible urban mobility in future megacities.

## TECHNOLOGY TRENDS

### Mobility

Due to environmental regulations electric mobility (e-mobility) is already penetrating the market of individual and fleet vehicles. However, almost all e-cars are powered by batteries whose capacity provides a rather limited range, even with the most advanced Li-ion technology. A major drawback of these batteries is the time required for re-charging, an exploitation process of the raw materials which is not sustainable. In addition, the long term supply of some important raw materials for the mass production of these batteries is still unknown. An alternative fuel is hydrogen for fuel cell powered e-cars. Hydrogen is generally available in abundance if generated via electrolysis. However, generation costs of hydrogen and the costs of fuel cell cars are not yet competitive to conventional cars. Research and development efforts in many countries are focusing on cost reduction of fuel cells and hydrogen generation. However, the trend towards electric mobility either powered by batteries or fuel cells will be irreversible.

Public ground transportation systems are based on rail-wheel technology which have a long history, and bus. Besides these conventional technologies more advanced systems, such as magnetic levitation (Maglev) trains have been developed and successfully tested. Some of them are in commercial operation. Examples are the Transrapid, developed in Germany and in commercial operation since 2002 in Shanghai/China. Other examples are the Linimo in Japan and the Rotem Ecobee in South Korea. All are Maglev systems, using the linear motor drive system for propulsion and the electromagnetic principle for levitation and guidance. They differ in the structural design of the levitation and the guidance system. Another system which is in preparation for commercialization is the JR Maglev. This system uses the electro-dynamic principle and onboard superconducting magnet coils for levitation and guidance.

### Information and Communication

The last few decades experienced rapid progress in microelectronics, miniaturization and integration of a variety of functionalities into small devices accompanied by a dramatic increase in performance. A similar progress could be seen in the fields of software system development, data processing and communication technology, especially in wireless communication technology. A few decades ago, electronic devices managed and improved the performance of engines. Increasing wireless communication technology enabled navigation and infotainment features in vehicles. Today, embedded systems allow car-to-car communication and driver assistance, and algorithms based on artificial intelligence (AI) enable automated or autonomous driving. At many places around the world tests with autonomous driving are carried out. Besides comfort for driver and passengers this is considered as an improvement of safety in traffic in the near future.

The intelligent combination of such embedded systems with advanced transportation technologies could contribute to a sustainable, efficient and flexible urban transportation in future urban transportation. The challenge is an intelligent combination of information and communication technology with e-mobility technologies to cover personal individual transportation needs and higher-ranking requirements of public transportation. Wireless communication via smartphone could provide the missing link between personal transportation needs and public transportation systems. In the following the vision of “Mobility on Demand” is presented, illustrating how this could be realized.

## INNOVATIVE TRANSPORTATION SOLUTIONS

### Personal transportation by linear drive systems

Residential and office buildings in future megacities will be large-scale buildings, requiring efficient and flexible transportation inside the building complex. The innovative concept of MULTI [3] of thyssenkrupp is a disruptive re-invention of the elevator function which could revolutionize the personal transportation in building complexes. It applies the linear motor technology developed for the magnetic levitation train Transrapid to elevator cabins.

The cabins move in shafts in the same way as trains in rail systems. The linear motor system together with the fact that no ropes are necessary allows vertical as well as horizontal movements inside the building. Even various cabins can move in the same shaft at the same time. In addition this concept allows the use of new and lightweight materials substantially reducing the overall weight of the elevator compared to conventional ones. The functional concept of this MULTI system is illustrated in Fig. 2, and its implementation in a building complex in Fig. 3.

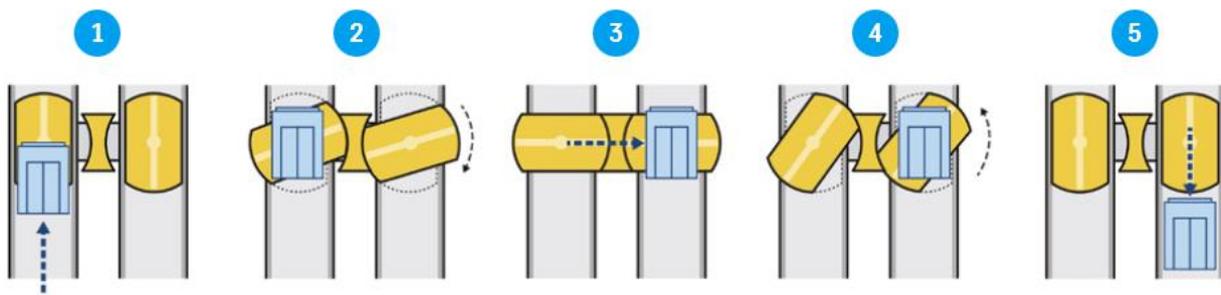


Fig. 2. Illustration of the functional concept of the MULTI system [3]

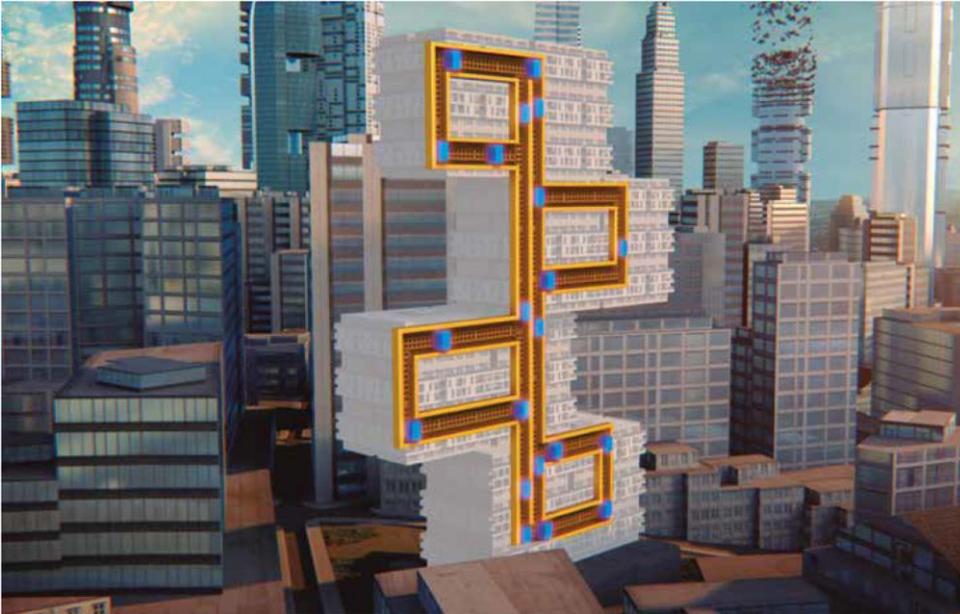


Fig. 3. Implementation of the MULTI system in a large scale building complex [3]

### Urban Maglev systems for public metropolitan transportation

Several urban Maglev systems have been developed in Germany, Japan, China and South Korea. They are using different technologies and structural designs but their common principle is the electro-magnetic principle and the linear motor drive. Germany's high speed development Transrapid uses the attractive force of magnets beneath a guideway to lift the train up (bearing magnets for levitation) and long-stator coils for propulsion. The Transrapid operates at a speed up to 500 km/h. The structure of the Transrapid's bearing and propulsion system is illustrated in Fig. 4a.

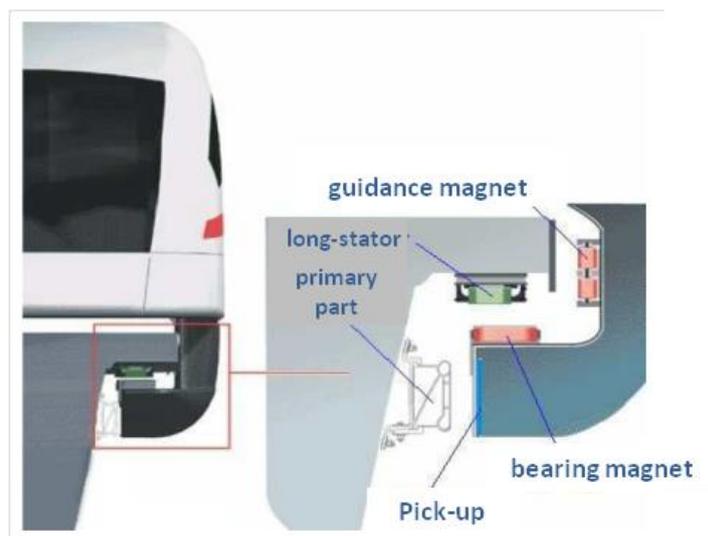


Fig. 4a. Structure of the bearing and propulsion system of TR08 [4]

Fig. 4b shows the Shanghai Maglev Train (Transrapid) in operation.



Fig. 4b. The Transrapid leaving the station in Shanghai [5]

The Japanese Linimo uses the attractive force of magnets beneath a guideway to lift the train up, too. For propulsion a linear motor and short-stator coils are used. The maximum speed is limited to 100 km/h. The Linimo car in operation is shown in Fig. 5.



Fig. 5 The Linimo in operation [6]

The Ecobee urban Maglev train also uses the attractive force of magnets beneath a guideway to lift the train up. For propulsion a linear motor and a long-pole design is employed to reduce the magnetic drag forces. The designed top speed is 110 km/h.

R&D activities exist in many countries, especially in Eastern Europe and in Asia. Therefore, more advanced Maglev system designs for urban and long-distance transportation can be expected, and we focus on urban Maglev systems in general, with no restriction of the vehicle and guideway design. We even assume that in the future standardized small modular units could be developed which can temporarily be linked to other units, like in a chain.

## VISION OF “MOBILITY ON DEMAND”

### Flexible transportation service on demand

The elements of this vision are the MULTI system for transportation inside large-scale building, urban Maglev systems for public transportation in cities and state of the art information and communication technologies. Combining these elements a flexible transportation service on demand can be realized. The transportation service process is performed in the following way: A person (the customer) planning his travel from his actual position “A” to a certain destination “B” communicates via a smartphone app to the central traffic coordination center (TCC) of the city, transmitting the information about his actual position “A”, the destination “B” and his personal preferences and individual options. In the traffic coordination TCC center the most efficient route between his position “A” and the destination “B” is automatically identified, based on the locations “A” and “B”, the customer’s options and the availability of the urban transportation system. The result with detailed information about the transportation lines, the schedule including transfer times is sent to the customer. After approving the suggested traveling plan a cabin of the MULTI system inside the building is sent to the nearest location of the customer’s position. The Maglev station close to the building and the next available urban Maglev train is informed about the arrival of the new passenger. The customer is continuously online informed via his navigation app on his smartphone about the status of his schedule. The concept of this vision is illustrated in Fig. 6.

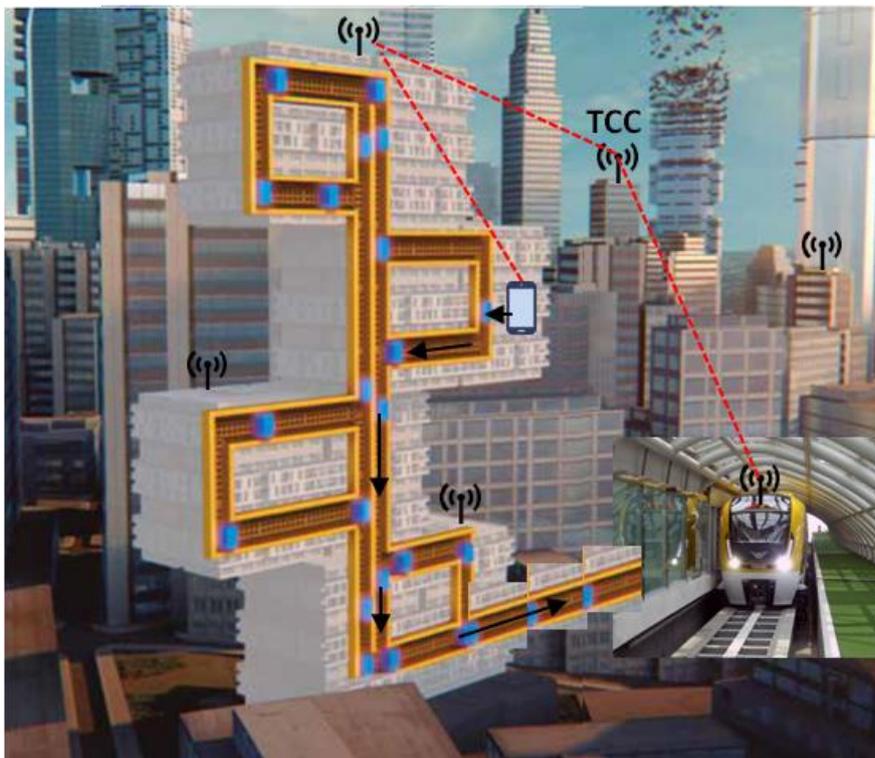


Fig. 6. Illustration of the flexible transportation system on demand

Such systems provide most efficient personal transportation in terms of traveling time, connections and availability of transportation systems. Individual options and higher-ranking requirements of public transportation are combined in an optimum way.

The concept can even be extended to larger building complexes. The MULTI-system is not restricted to one single building, it could connect neighboring buildings, as illustrated in Fig. 7

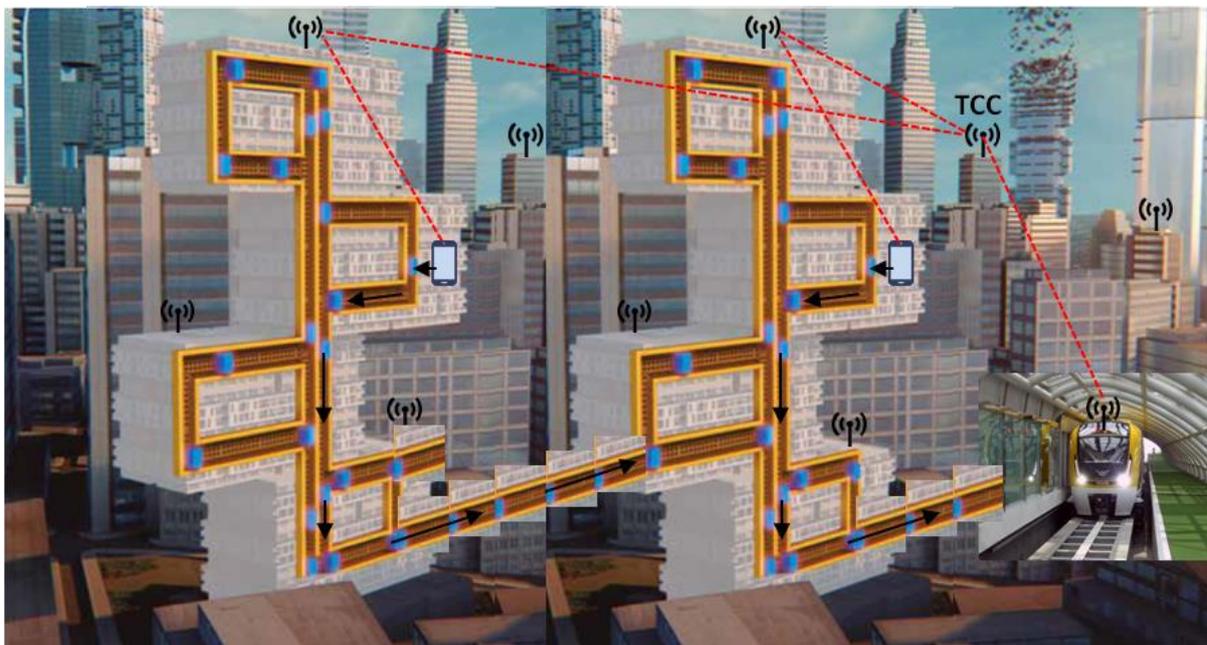


Fig. 7. Illustration of larger building complexes connected by MULTI-system

### **New business opportunities by Mobility on Demand**

The idea of mobility on demand offers a new business opportunity for an organization “coordination center” which provides the service of transportation on demand. It overlooks and communicates with all participating transportation systems and building managers. Providing mobility on demand in future megacities 24 hours 7 days a week, satisfying individual personal needs and higher-ranking requirements of an efficient public transportation will be an important feature in a future sustainable and comfortable urban transportation. Energy consumption can be minimized and capacity of urban transporting optimized.

## **CONCLUSION**

In the article, a vision of an urban transportation system in future megacities has been presented, which is based on an extrapolation of state of the art technologies in mobility and information and communication.

**The authors make it expressly clear that:**

1. No conflict of interests has taken or may take place;
2. The present article does not contain any researches with people as the objects involved.

**References**

1. 2018 Revision of World Urbanization Prospects [Internet]. *United Nations / Department of Economic and Social Affairs*. [cited 2019 Jul 09]. Available from: <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
2. Bauen für die Zukunft – Zukunft für den Bau, Heute für die Welt von morgen bauen. Fraunhofer Bau. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. Fraunhofer-Allianz Bau, 2012 [Internet]. [cited 2019 Jul 09]. Available from: <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/institute.../fraunhofer-allianz-bau.pdf>
3. Casting a glance into future mobility: thyssenkrupp shows ropeless MULTI at the German Pavilion of EXPO 2020 Dubai [Internet]. *Daily press*, 2019 11 Jul. [cited 2019 Jul 09]. Available from: <https://www.thyssenkrupp-elevator.com/en/newsroom/press-releases-93760.html?id=2417166>
4. Bühler G, Czainski R. *CPS for the high-speed magnetic levitation system of Transrapid TR08*, 2005.
5. MAGLEV BOARD [Internet]. Pics, Transrapid. [cited 2019 Jul 09]. Available from: <https://www.maglevboard.net/en/pics#gallery4b25bb6ea4-27>
6. MAGLEV BOARD [Internet]. Pics, Transrapid. [cited 2019 Jul 09]. Available from: <https://www.maglevboard.net/en/pics/linimo-urban-maglev#gallery7f45cdb446-10>
7. Paturi FR. *Baumeister unserer Zukunft: Kühne Projekte der Forscher, Erfinder und Ingenieure in aller Welt*. Econ Verlag; 1975. 227 p. (In German). [Internet]. ISBN 3-430-17379-5. [cited 2019 Jul 09]. Available from: <https://isbsearch.org/isbn/3430173795>

**Information about the authors:****Roland Kircher, Dr.;**

ORCID: 0000-0002-8807-8915;

E-mail: rk@maglevboard.net

**Johannes Kluehspies, Dr. habil. Dr. h.c., full professor;**

ORCID: 0000-0001-6089-9853;

E-mail: jok@maglevboard.net

**Eckert Fritz, Dipl. Eng.;**

ORCID: 0000-0003-3422-227X;

E-mail: ef@bahntechnik.de

**Reiner Köhler;**

E-mail: reiner.koehler@thyssenkrupp.com

**To cite this article:**

Kircher R, Kluehspies J, Fritz E, Koehler R. Mobility of Demand – Vision of a Flexible Future Urban Mobility. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):130-138. doi: 10.17816/transsyst201952130-138